

# **MEDIÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE E SUA IMPORTÂNCIA NO DIAGNÓSTICO**

**ANDRÉ OLIVEIRA MOREIRA DOMINGUES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas

JUNHO DE 2016

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-5081440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Irmão

*"A imaginação é a mais importante que o conhecimento"*

*Albert Einstein*



## **AGRADECIMENTOS**

Com a finalização da presente dissertação, quero agradecer primeiramente aos meus pais que me proporcionaram ter o privilégio de ingressar no ensino superior e ter a melhor educação possível. Desde sempre estiveram do meu lado a apoiar-me intensamente.

Pretendo ainda agradecer ao meu irmão, que embora distante, mantém uma ligação emocional que me dá força para superar os objetivos.

Aos meus avós que ternamente se preocupam comigo e que certamente vão ficar felizes com o terminar de mais uma etapa da minha vida.

À minha namorada, que me apoia na concretização dos meus objetivos de vida e dá-me força para nunca desistir dos meus sonhos.

Aos meus amigos.

Agradeço por último ao meu orientador, Professor Doutor Vasco Freitas, pelo apoio, motivação, disponibilidade e enorme compreensão demonstrada.



## RESUMO

Na medida em que a humidade contida em elementos de construção é um dos principais fatores que influenciam a durabilidade dos materiais de construção, o presente trabalho tem como objetivo sensibilizar para a importância da medição do teor de humidade de materiais de construção no controlo de qualidade, diagnóstico de patologias e monitorização. É demonstrada não só a indispensabilidade do conhecimento profundo dos métodos de medição mais indicados para cada situação, como também, a importância do conhecimento do teor de humidade de referência para que se possa interpretar os resultados medidos. Neste sentido, foi efetuado um estudo intensivo dos diferentes métodos de determinação e respetiva aplicabilidade a determinados materiais. São ainda evidenciadas vantagens e limitações dos distintos métodos.

Realizou-se uma aplicação experimental de medição do teor humidade a dois casos de estudo pela utilização de dois equipamentos distintos disponibilizados pelo LFC (laboratório de física das construções). Os resultados dos valores do teor de humidade relativa obtidos pela leitura dos equipamentos utilizados no ensaio foram essenciais para que fosse possível, com recurso a uma ferramenta de cálculo (MATLAB), um mapeamento qualitativo de áreas húmidas. Assim sendo, foi permissível elaborar uma análise crítica sobre: a importância do mapeamento no diagnóstico de manifestações de humidade, a reprodutibilidade de resultados e a sensibilidade destes equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Teor de humidade, métodos de medição, medição *in situ*.









## ABSTRACT

The Humidity in building components is one of the main factors affecting the durability of building materials. This work aims at emphasizing the importance of measuring the moisture content of building materials in quality control, diagnosis of pathologies and monitoring. It is demonstrated that it is fundamental to have of deep knowledge of the best measurement methods in each situation and that it is important to know the reference moisture content in order to interpret the results and measure humidity. Therefore, an intensive study of the different measurement methods and respective applicability to certain materials was made. The advantages and limitations of the different methods are also highlighted.

An experimental application for measuring the moisture content to two study cases with the use of two different equipment provided by LFC (building physics laboratory) was conducted. The results of the values of relative moisture content obtained by reading the equipment used were essential to make it possible, using a calculation tool (MATLAB), to draw a qualitative mapping of the moist areas.

Therefore, it was permissible to develop a critical analysis on: the importance of mapping in the diagnosis of humidity manifestations, reproducibility of results and the sensitivity of these materials.

**KEY-WORDS:** Moisture content, measurement methods, *in situ* measurement.



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	V

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIA .....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4

<b>2. VALORES DE REFERÊNCIA DO TEOR DE HUMIDADE .....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. TEOR DE HUMIDADE .....	5
2.2.1. NÍVEIS DE TEOR DE HUMIDADE .....	6
2.3. VALORES DE REFERÊNCIA .....	9
2.4. MANIFESTAÇÕES DE HUMIDADE .....	11
2.4.1. HUMIDADE DE CONSTRUÇÃO .....	12
2.4.2. HUMIDADE SUPERFICIAL .....	12
2.4.3. HUMIDADE DE CONDENSAÇÃO SUPERFICIAL INTERIOR .....	13
2.4.4. HUMIDADE ASCENSIONAL .....	15
2.4.5. HUMIDADE DE INFILTRAÇÃO/ PRECIPITAÇÃO .....	17
2.4.6. HUMIDADE DE HIGROSPICIDADE DOS MATERIAIS .....	18
2.4.7. HUMIDADE RESULTANTE DE CAUSAS FORTUITAS/ACIDENTAIS .....	18

<b>3. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE .....</b>	<b>19</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	19
3.2. MÉTODO GRAVIMÉTRICO .....	19
3.2.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO .....	19
3.2.2. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL .....	21
3.2.3. CALIBRAÇÃO .....	22
3.2.4. PROCEDIMENTO DE ENSAIO .....	23
3.2.5. ERROS DE MEDIÇÃO .....	25

<b>3.3. MÉTODO CARBONATO DE CÁLCIO .....</b>	<b>25</b>
3.3.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO .....	25
3.3.2. EQUIPAMENTO .....	26
3.3.3. CALIBRAÇÃO.....	28
3.3.4. PROCEDIMENTO.....	28
3.3.5. ERROS .....	31
<b>3.4. MÉTODO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....</b>	<b>32</b>
3.4.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO .....	32
3.4.2. EQUIPAMENTO .....	32
3.4.3. CALIBRAÇÃO.....	33
3.4.4. PROCEDIMENTO.....	34
3.4.5. ERROS .....	35
<b>3.5. MÉTODO ELÉTRICO DE CAPACITÂNCIA.....</b>	<b>36</b>
3.5.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO .....	36
3.5.2. EQUIPAMENTOS .....	37
3.5.3. CALIBRAÇÃO.....	38
3.5.4. PROCEDIMENTO.....	38
3.5.5. ERROS .....	39
<b>3.6. MÉTODO DE MEDIÇÃO MICRO-ONDAS.....</b>	<b>39</b>
3.6.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO .....	39
3.6.2. EQUIPAMENTOS .....	41
3.6.3. CALIBRAÇÃO.....	41
3.6.4. PROCEDIMENTO.....	42
3.6.5. ERROS .....	43
<b>3.7. MÉTODO TDR .....</b>	<b>44</b>
3.7.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO .....	44
3.7.2. EQUIPAMENTOS .....	46
3.7.3. CALIBRAÇÃO.....	47
3.7.4. PROCEDIMENTO.....	48
3.7.5. ERROS .....	49
<b>3.8. MÉTODO DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA.....</b>	<b>49</b>
3.8.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO .....	49
3.8.2. EQUIPAMENTOS .....	51

3.8.3. CALIBRAÇÃO.....	53
3.8.4. PROCEDIMENTO.....	54
3.8.5. ERROS .....	54
<b>3.9. MÉTODO DE RESSONÂNCIA NUCLEAR .....</b>	<b>55</b>
3.9.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO .....	55
3.9.2. EQUIPAMENTO .....	55
3.9.3. CALIBRAÇÃO.....	56
3.9.4. PROCEDIMENTO.....	57
3.9.5. ERROS .....	58
<b>3.10. RESUMO ESQUEMÁTICO DOS MÉTODOS.....</b>	<b>59</b>

<b>4. APLICAÇÃO A UM CASO DE ESTUDO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE HUMIDADE .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>4.2. INTRODUÇÃO Á FERRAMENTA DE CÁLCULO PARA MAPEAMENTO DE HUMIDADES .....</b>	<b>64</b>
4.2.1. O QUE É O MATLAB?.....	64
4.2.2. SIMULAÇÃO GRÁFICA .....	65
<b>4.3. APRESENTAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO .....</b>	<b>72</b>
4.3.1. CASO DE ESTUDO 1 (P1) – IDENTIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO .....	72
4.3.2. CASO DE ESTUDO 2 (P2) – IDENTIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO .....	73
<b>4.4. METODOLOGIA GERAL .....</b>	<b>74</b>
<b>4.5. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....</b>	<b>75</b>
<b>4.6. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
4.6.1. CASO DE ESTUDO 1 (P1) – RESULTADOS .....	78
4.6.1.1. REGISTOS METEOROLÓGICOS (P1) .....	78
4.6.1.2. RESULTADOS HUMIDIMÈTRE (P1H).....	81
4.6.1.3. RESULTADOS PROTÍMETER (P1P) .....	82
4.6.1.4. REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS – MAPEAMENTO HUMIDIMÈTRE (P1H).....	83
4.6.1.5. REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS – MAPEAMENTO PROTÍMETER (P1P) .....	84
4.6.2. CASO DE ESTUDO 2 – RESULTADOS.....	85
4.6.2.1. REGISTOS METEOROLÓGICOS (P1) .....	85
4.6.2.2. RESULTADOS HUMIDIMÈTRE (P2H).....	88
4.6.2.3. RESULTADOS PROTÍMETER (P2P) .....	89

4.6.2.4. REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS – MAPEAMENTO HUMIDIMÈTRE (P2) .....	90
4.6.2.5. REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS – MAPEAMENTO PROTIMETER (P2) .....	91
<b>4.7. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS</b> .....	<b>92</b>
4.7.1.1. REGISTOS METEOROLÓGICOS (P1s) .....	92
4.7.1.2. RESULTADOS HUMIDIMÈTRE (P1s) .....	92
<b>4.8. ANÁLISE CRÍTICA</b> .....	<b>95</b>
 <b>5. CONCLUSÕES</b> .....	 <b>97</b>
5.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS .....	97
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	98
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	 <b>99</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Importância do teor de humidade nos diferentes atos de construção .....	2
Fig. 2 - Níveis do teor de humidade do material (kg/kg) .....	7
Fig. 3 - Representação de situações em que o teor de humidade é inferior ao crítico (imagem da esquerda) e onde é superior ao crítico (imagem da direita) .....	7
Fig. 4 - Etapas de fixação de vapor de água por adsorção no domínio higroscópico [1] .....	8
Fig. 5 - Curva típica de equilíbrio higroscópico de materiais porosos com respetiva definição do domínio higroscópico, capilar, o teor de humidade crítico ( $W_{cr}$ ), o teor de humidade de saturação ( $W_{sat}$ ) e o teor máximo de humidade de saturação nos poros ( $W_{máx}$ ).....	9
Fig. 6 - Excesso de água em argamassas .....	12
Fig. 7 - Molhagem excessiva do tijolo (assentamento) .....	12
Fig. 8 - Esquema representativo de dois elementos construtivos idênticos sujeitos a diferentes condições de Temperatura, humidade relativa e pressões interiores e exteriores distintas. Na situação da esquerda todas as variáveis mantêm-se constantes, no caso da direita existe gradiente de temperatura e variações de humidade relativa e de pressão .....	14
Fig. 9 - Condensação num vão envidraçado .....	14
Fig. 10 - Condensação em elementos estruturais não aparentes .....	15
Fig. 11 - Parede com manifestação de humidade ascensional .....	16
Fig. 12 - Parede com manifestação acentuada de humidade ascensional devido ao revestimento cerâmico funcionar como um impermeabilizante parcial .....	16
Fig. 13 - Parede com manifestação de humidade ascensional devido a pendente (degraus) para a parede exterior .....	17
Fig. 14 - Infiltração pontual por deficiente fixação do tubo de queda .....	17
Fig. 15 - Infiltração devido a rotura de canalizações.....	18
Fig. 16 - Este diagrama ilustra os diferentes teores de humidade para diferentes materiais de construção, todos em equilíbrio. O exemplo à esquerda e à direita mostra a condição seca (seguro) e molhada (perigoso), respetivamente .....	20
Fig. 17 - Balança de precisão de 1mg com estrutura de vidro, para limitar a influência de poeira e fluxos de ar na medição e estufa ventilada .....	22
Fig. 18 - Termo balança portátil para aplicações do método gravimétrico no local.....	22
Fig. 19 - Medição da pressão (bar), em função do tempo decorrido (segundos), de uma reação química entre o carboneto de cálcio( $CaC_2$ ) e água líquida destilada( $H_2O$ ) .....	26
Fig. 20 - Equipamento de medição do método de cálcio carboneto: (1) garrafa de pressão de gás, (2) carbureto de cálcio ampola, (3) esferas de aço (4), manómetro.....	27
Fig. 21 - Kit para o método de cálcio carboneto. (1) Garrafa de pressão com termómetro de superfície, (2) manómetro digital, (3) recipiente para armazenar a amostra, (4) escova de limpeza,	

(5) ampolas de carbonato de cálcio (6) utensílio para recolha de amostras, (7) etiquetas para rotular as amostras, (8) mala de transporte, (9) sacos de plástico estanques .....	27
Fig. 22 - Junta desgastada e sinais de sujidade .....	28
Fig. 23 - Sequência de colocação na garrafa de pressão no procedimento de calibração. (1) esferas de aço, (2) ampola de água destilada, (3) ampola de carbonato de cálcio .....	28
Fig. 24 - Procedimento de recolha de amostras para um saco estanque e respetivo esmagamento manual com recurso a um martelo de 1000g.....	31
Fig. 25 - Teor de humidade da Madeira (%) em função da resistência elétrica logarítmica (M $\Omega$ ) medido a 27 °C. A área sombreada corresponde a 90% dos valores de teste .....	32
Fig. 26 - Equipamento Protimeter para medição do teor de humidade através dos 2 elétrodo (método de resistência elétrica) .....	33
Fig. 27 - Equipamento de medição do teor de húmida, configurado no modo “pinless” (capacitância) [ .....	38
Fig. 28 - Espetro eletromagnético que traduz a frequência (Hz) e comprimento de onda (m) no vazio .....	40
Fig. 29 - Gráfico comparativo da atenuação de onda emitida pelo transmissor no momento t0 e respetivo decréscimo (atenuação de picos) quando atravessa um meio dielétrico no momento t1 (linha preta) em relação a uma onda propagada no vazio. (linha tracejada) .....	41
Fig. 30 - Profundidade de atuação de um equipamento baseado na técnica micro-ondas (esquerda) e capacitância (direita).....	42
Fig. 31 - Raio de atuação de um equipamento baseado na técnica micro-ondas aplicado somente num material (tijolo se estar em contacto com a argamassa) .....	43
Fig. 32 - Atenuação de sinal (AU) emitido pelo aparelho á medida que a distância, L (cm) , entre a sonda e objeto aumenta (linha azul escuro). A Linha azul clara é uma regressão da atenuação dos picos .....	44
Fig. 33 - Exemplo de aplicação do método TDR que relaciona a voltagem do sinal (mV) em função do tempo percorrido (ps) para o material seco (em cima) e húmido (em baixo) .....	46
Fig. 34 - O gráfico traduz uma comparação da medição do teor de humidade, em percentagem (volumétrico), através do método gravimétrico e TDR, de duas amostras de solo idênticos, mas sujeitos a condições de precipitação diferente. A linha contínua traduz uma relação perfeita de 1:1. A situação 1 corresponde ao provete com condições de precipitação menores. A situação 2 corresponde á amostra de solo sujeita a precipitação mais intensa .....	48
Fig. 35 - Distribuição espectral da medição do processo de interação dos raios gama no cristal dos diferentes processos (fotolétrico, compton, produção de pares) e respetivo aumento de cintilações ..	49
Fig. 36 - a) Detetor e proteção com colimador e b) proteção e colimador da fonte radioativa.....	52
Fig. 37 - Aplicação do detetor e proteção com colimador à fonte radioativa no suporte metálico (imagem da direita) .....	52
Fig. 38 - Unidade eletrónica .....	53
Fig. 39 - Conjunto do sistema de medida. Unidade eletrónica e estrutura de suporte ajustável .....	53

Fig. 40 - Análise comparativa da massa obtida por secagem e por integração dos perfis hídricos – embebição do betão celular (primeiro gráfico). Análise comparativa da massa obtida por secagem e por integração dos perfis hídricos – secagem do betão celular (segundo gráfico) .....	53
Fig. 41 - Sistema de medição portátil do teor de humidade através da técnica NMR de acesso unilateral .....	56
Fig. 42 – Conjunto do íman e respetiva bobina .....	56
Fig. 43 - Medição do teor de água pela aplicação do método NMR a uma amostra de betão leve e respetiva calibração através do método destrutivo (gravimétrico).....	57
Fig. 44 - Correlação entre o teor de humidade medido com o método NMR e o teor de humidade medido por gravimetria de 2 tipos de cimento Portland (CEM1 e CEM2) e uma argamassa tradicional .....	57
Fig. 45 – Funcionamento esquemático do equipamento NMR portátil de acesso unilateral.....	58
Fig. 46 – Equipamento NMR portátil de acesso unilateral, munido de uma plataforma elevatória .....	58
Fig. 47 – Interface do programa MATLAB .....	65
Fig. 48 - Interface do programa MATLAB .....	66
Fig. 49 – Programa MATLAB .....	66
Fig. 50 - Programa MATLAB .....	67
Fig. 51 - Programa MATLAB .....	67
Fig. 52 - Programa MATLAB .....	68
Fig. 53 - Programa MATLAB .....	69
Fig. 54 - Programa MATLAB .....	69
Fig. 55 - Programa MATLAB .....	70
Fig. 56 - Programa MATLAB .....	71
Fig. 57 - Programa MATLAB .....	71
Fig. 58 - Programa MATLAB .....	72
Fig. 59 - Compartimento principal voltado a norte onde existe manifestações de humidades (P1).....	73
Fig. 60 – Patologia evidenciada na parede do caso de estudo 2 (P2) .....	74
Fig. 61 - Patologia evidenciada na parede do caso de estudo 2 (P2) .....	74
Fig. 62 – Humidimètre CEBTP-MXU .....	76
Fig. 63 – Curva de calibração para materiais distintos (betão, argamassa, gesso) [63] .....	76
Fig. 64 – Protimeter MMS2 .....	77
Fig. 65 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 10/05/2016 .....	78
Fig. 66 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 10/05/2016.....	78
Fig. 67 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 17/05/2016 .....	79
Fig. 68 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 17/05/2016.....	79

Fig. 69 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 21/05/2016 .....	79
Fig. 70 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 21/05/2016.....	80
Fig. 71 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 25/05/2016 .....	80
Fig. 72 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 25/05/2016.....	80
Fig. 73 - Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Humidimètre calibrado com o valor 200 (P1H1) .....	81
Fig. 74 - Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Humidimètre calibrado com o valor 200 (P1H2) .....	81
Fig. 75 – Diferença das leituras registadas com o Humidimètre entre o primeiro e segundo ensaio ...	82
Fig. 76 - Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Protimeter MMS2 (P1P1).....	82
Fig. 77 - Segundo ensaio com recurso ao equipamento Protimeter MMS2 (P1P2).....	82
Fig. 78 - Diferença das leituras registadas com o Protimeter entre o primeiro e segundo ensaio .....	82
Fig. 79 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo primeiro ensaio medido com o equipamento Humidimetre calibrado para o valor de 200 (caso de estudo 1) (P1H1).....	83
Fig. 80 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo segundo ensaio medido com o equipamento Humidimetre calibrado para o valor de 200 (caso de estudo 1) (P1H2).....	83
Fig. 81 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo primeiro ensaio medido com o equipamento Protimeter.(caso de estudo 1) (P1P1).....	84
Fig. 82 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo segundo ensaio medido com o equipamento Protimeter. (caso de estudo 1) (P1P2).....	84
Fig. 83 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 15/05/2016 .....	85
Fig. 84 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 15/05/2016.....	85
Fig. 85 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 18/05/2016 .....	86
Fig. 86 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 18/05/2016.....	86
Fig. 87 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 22/06/2016 .....	86
Fig. 88 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 22/05/2016.....	87
Fig. 89 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 06/06/2016 .....	87
Fig. 90 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 06/06/2016.....	87
Fig. 91 – Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Humidimètre calibrado com o valor 200 (P2H1) .....	88
Fig. 92 - Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Humidimètre calibrado com o valor 200 (P2H2) .....	88
Fig. 93 -Diferença das leituras registadas com o Humidimètre entre o primeiro e segundo ensaio .....	88
Fig. 94 – Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Protimeter MMS2 (P2P1) .....	89
Fig. 95 –Segundo ensaio com recurso ao equipamento Protimeter MMS2 (P2P2) .....	89

Fig. 96 - Diferença das leituras registadas com o Protimeter MMS2 entre o primeiro e segundo ensaio .....	89
Fig. 97 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo primeiro ensaio medido com o equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 200 (caso de estudo 2) (P2H1) .....	90
Fig. 98 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo segundo ensaio medido com o equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 200 (caso de estudo 2) (P2H2) .....	90
Fig. 99 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo primeiro ensaio medido com o equipamento Protimeter (caso de estudo 2) (P2P1) .....	91
Fig. 100 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo segundo ensaio medido com o equipamento Protimeter (caso de estudo 2) (P2P2) .....	91
Fig. 101 – Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 27/05/2016 .....	92
Fig. 102 – Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 27/05/2016 .....	92
Fig. 103 - Equipamento calibrado para 190 .....	93
Fig. 104 - Equipamento calibrado para 200 .....	93
Fig. 105 - Equipamento calibrado para 210 .....	93
Fig. 106 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 190 (caso de estudo 2) .....	94
Fig. 107 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 200 (caso de estudo 2) .....	94
Fig. 108 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 210 (caso de estudo 2) .....	95

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Valores do teor de humidade dos materiais em kg/m <sup>3</sup> .....	10
Quadro 2 – Valores de teores de humidade dos materiais para humidades relativas de 50% e 80%..	11
Quadro 3 – Precisão da balança consoante a precisão do teor de humidade desejado .....	21
Quadro 4 – Temperatura de secagem (°C) em estufa aconselhada de acordo com o material. ....	24
Quadro 5 – Quantidade de massa de amostra necessária consoante o teor de humidade assumido .	29
Quadro 6- Tabela de conversão para uma temperatura ambiente de 20°C (kg/kg) .....	30
Quadro 8 – Estado do material consoante os valores apresentados pelo Protimeter.....	77

**SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

Hr- Humidade relativa (%)

$w$  - Teor de humidade mássico ou ponderal (kg/kg)

$w_{cr}$  - Teor de humidade mássico crítico (kg/kg)

$w_{sat}$  - Teor de humidade mássico de saturação (kg/kg)

$w_{máx}$  - Teor de humidade mássico máximo (kg/kg)

$w_h$  - Domínio higroscópico (kg/kg)

$w_{cap}$  - Domínio capilar (kg/kg)

$u$  - Teor de humidade em massa por unidade de volume (kg/m<sup>3</sup>)

$u_{cr}$  - Teor de humidade em massa por unidade de volume crítico (kg/m<sup>3</sup>)

$u_{sat}$  - Teor de humidade de saturação em massa por unidade de volume (kg/m<sup>3</sup>)

$u_{máx}$  - Teor de humidade máximo em massa por unidade de volume (kg/m<sup>3</sup>)

$\theta$  - Teor de humidade volúmico (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$\theta_{cr}$  - Teor de humidade volúmico crítico (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$\theta_{sat}$  - Teor de humidade volúmico de saturação (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$\theta_{máx}$  - Teor de humidade volúmico máximo (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$\rho$  - Densidade (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_w$  - Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  - Densidade da amostra seca (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_0$  - Densidade da amostra seca (kg/m<sup>3</sup>)

$V_s$  - Volume da amostra seca (m<sup>3</sup>)

$V_e$  -Volume de água do material (m<sup>3</sup>)

$m_h$  - Massa da amostra húmida (kg)

$m_s$  - Massa da amostra húmida (kg)

$I$  - Intensidade transmitida pelo feixe (contagens/s)

$I_0$  - Intensidade da radiação incidente (contagens/s)

$I_w$  - Intensidade da amostra molhada (contagens/s)

$I_s$  - Intensidade da amostra seca (contagens/s);

$\mathcal{G}$  - Coeficiente de absorção ou atenuação do material ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )

$\mathcal{G}_s$  - Coeficiente de absorção da amostra seca ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )

$\mathcal{G}_w$  - Coeficiente de absorção da água ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )

$C$  - Capacitância

$\varepsilon$  - Permissividade relativa do meio envolvente (-)

$\varepsilon_v$  - Permissividade relativa do vácuo (-)

$\varepsilon_{ar}$  - Permissividade relativa do ar (-)

$\varepsilon_w$  - Permissividade relativa da água (-)

$A$  - Área ( $\text{m}^2$ )

$L$  - comprimento (m)

$d$  - Espessura do material (m)

$\lambda$  - Comprimento de onda (m)

$f$  - Frequência (Hz)

$c$  - Velocidade de propagação ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$t_p$  - Tempo de percurso ao longo do sensor de TDR (PS)

$t_{ar}$  - O tempo de percurso no ar (PS)

$t_w$  - O tempo de percurso da água (PS)

$\theta_{si}$  - Temperatura superficial interior ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta_i$  - Coeficiente de transmissão térmica interior ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta_e$  - Temperatura exterior ( $^{\circ}\text{C}$ )

$U$  - Resistência superficial interior ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ )

$R_{si}$  - resistência superficial interior ( $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )

LFC – Laboratório de Física das Construções.

FEUP – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

NMR – Nuclear Magnetic Resonance.

CEBTP – Centre d'Expertise du Batiment et des Travaux Public.

FIG.- Figura.

P1H - parede do caso de estudo 1 com o equipamento Humidimètre



P1H1 – Primeiro ato de medição da parede do caso de estudo 1 com o equipamento Humidimètre.

P1H1 - Segundo ato de medição parede do caso de estudo 1 com o equipamento Humidimètre.

P1P - parede do caso de estudo 1 com o equipamento Protimeter.

P1P1 – Primeiro ato de medição da parede do caso de estudo 1 com o equipamento Protimeter.

P1P2 - Segundo ato de medição parede do caso de estudo 2 com o equipamento Protimeter.

P2H - Parede do caso de estudo 2 com o equipamento Humidimètre.

P2H1 – Primeiro ato de medição da parede do caso de estudo 2 com o equipamento Humidimètre.

P2H2 - Segundo ato de medição parede do caso de estudo 2 com o equipamento Humidimètre.

P2P - Parede do caso de estudo 2 com o equipamento Protimeter.

P2P1 – Primeiro ato de medição da parede do caso de estudo 2 com o equipamento Protimeter.

P2P2 - Segundo ato de medição parede do caso de estudo 2 com o equipamento Protimeter.

P2s – Estudo de sensibilidade realizado na parede do caso de estudo 2 com o equipamento Humidimètre



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A humidade contida nos elementos de construção é um dos principais fatores de deterioração dos respetivos materiais, uma vez que altera não só as suas características aparentes, como também as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Os efeitos mais frequentes da humidade manifestam-se ao nível da corrosão e deformação de materiais, e como consequência, verificam-se danos estruturais, degradação funcional e proliferação microbiana.

Sendo a presença de água uma das principais causas de patologias verificadas na construção, existe um especial interesse no que concerne à exploração e desenvolvimento dos diferentes métodos de medição do teor de humidade, técnicas e equipamentos existentes. Alguns destes métodos de deteção de humidade possibilitam enquadrar os materiais relativamente à quantidade de água que estes possuem e desta forma definir se estes se encontram “secos” ou “húmidos”. A resposta a estas necessidades nem sempre é conhecida, intuitiva ou consensual.

Pela análise da Fig. 1, constata-se a importância e o envolvimento dos vários intervenientes da construção na medição do teor de humidade

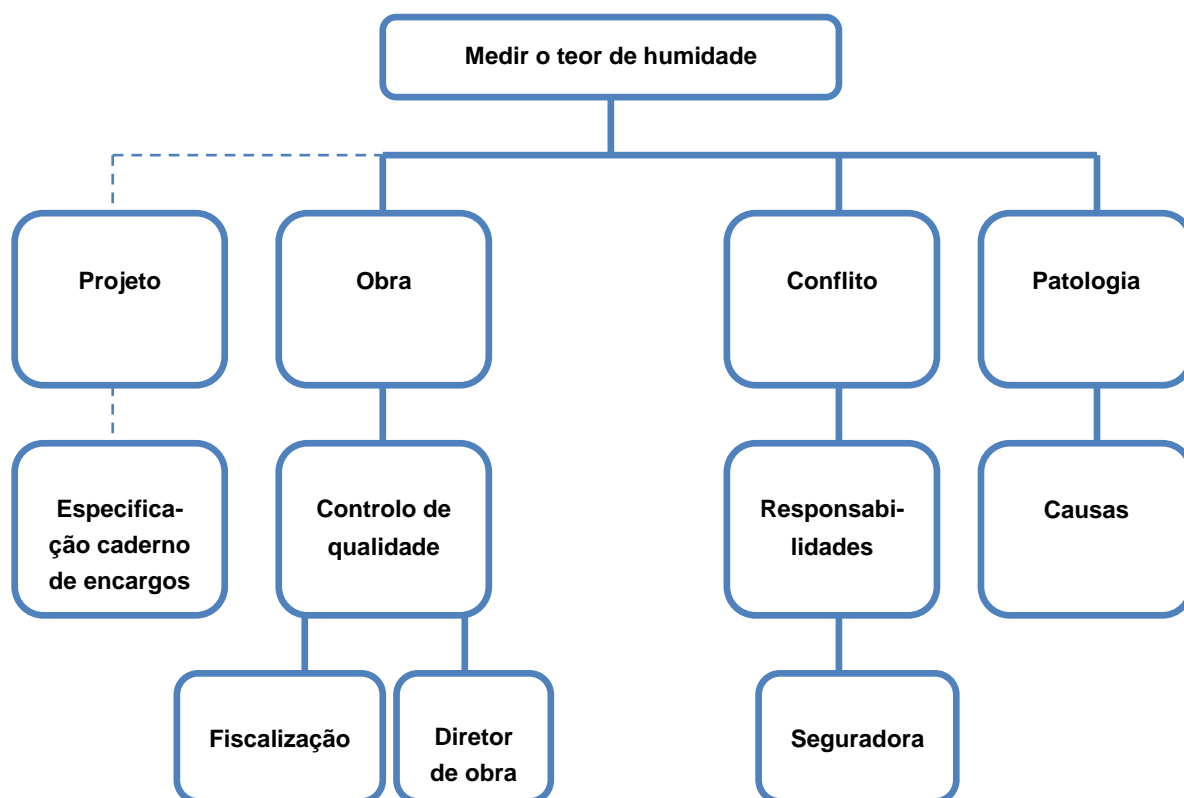


Fig. 1 - Importância do teor de humidade nos diferentes atos de construção

A título de exemplo, enumeram-se algumas situações em que a medição e interpretação deste parâmetro são, de facto, de interesse geral de todos os intervenientes (de construção), na medida em que constitui uma mais-valia para a longevidade e integridade dos materiais de construção, sendo igualmente uma ferramenta de decisão para diagnosticar humidades.

Na ótica do controlo de qualidade é de grande importância que o teor de humidade seja devidamente aferido no momento do fornecimento dos materiais e aplicação de revestimentos, (tais como tintas, vernizes, papéis de parede, gesso não hidrófugo e parqué), a elementos base ou de suporte, (tais como argamassas, betão, alvenaria de tijolo), de modo a garantir conformidade com o especificado no caderno de encargos. Este controlo pode ser realizado por parte das entidades fiscalizadoras (contratadas pelo Dono de obra), como também numa situação de inspeção (ordenada neste caso pelo diretor de obra). É ainda aconselhado que se tenha em consideração, para além da determinação do teor de humidade no momento de aplicação em obra, a determinação desse teor em diversos materiais que se encontram armazenados em estaleiro sob risco de degradação precoce, desenvolvimento de fungos, surgimento de manchas, decomposição, variações dimensionais, entre outras. A medição do teor de humidade só é útil se conhecermos os valores de referência, estes que devem ser fornecidos pelo fabricante ou determinados por via laboratorial (gravimetria). A determinação do teor de humidade do ponto de vista dos fornecedores de materiais assume, assim, uma particular relevância, na medida em que permite analisar, não só, as características, propriedades e limites de aplicação, mas também, perceber o seu comportamento face à presença de humidade.

No âmbito do cliente ou utilizador, que pretende adquirir o produto da construção, é permissível que este inspecione os níveis de humidade comparando-os com os valores de referência e deste modo aferir se há maior probabilidade de surgimento de problemas de humidade futuros. É importante notar

que os materiais, por vezes, não se encontram visivelmente húmidos, contudo, podem estar em situação de risco. Esta prática de medição pode contribuir para uma decisão mais ponderada e acertada na compra de um imóvel em detrimento de outro. Por outro lado, a deteção do referido parâmetro contribui para uma perceção da dimensão das anomalias e respetivas causas das patologias, o que em caso de conflito, pode servir como um facto preponderante na averiguação dos responsáveis pelos danos. Acresce ainda outro fator relevante, na medida que, tanto as seguradoras, como entidades de crédito, sentem-se mais confortáveis quando existe uma inspeção neste sentido.

É evidente a indispensabilidade da medição do presente parâmetro no diagnóstico de patologias em reabilitação ou recuperação de um elemento de construção. Normalmente nestas situações, a preservação dos elementos e materiais construtivos impera como primeira prioridade (nomeadamente na preservação de património histórico). Assim sendo, é essencial uma escolha criteriosa das técnicas de inspeção do teor de humidade, visto que existem métodos destrutivos e não destrutivos, tanto de aplicação laboratorial, como de aplicação *in situ*. Nestes casos, os resultados obtidos vão fornecer um inequívoco parecer quanto à avaliação e diagnóstico da patologia, o que consequentemente, terá influência na proposta de recuperação, reabilitação ou substituição dos elementos degradados.

Comparativamente há umas décadas atrás, hoje em dia existe um envolvimento crescente na fase de conceção e projeto, inclusivamente dando destaque a novas áreas emergentes, nomeadamente coordenação e revisão de projeto. Desta forma, o estabelecimento de valores de referência dos teores de humidade e a especificação da técnica de medição no caderno de encargos é um avanço nesse sentido, nomeadamente no que diz respeito a melhorias na preservação dos materiais e consequentemente nas condições de conforto, salubridade e higiene das infraestruturas.

Outro aspeto relevante prende-se com a necessidade de manutenção contínua das infraestruturas, pelo que a determinação do teor de humidade contribui como uma ferramenta fundamental de monitorização contínua de áreas de difícil acesso ou áreas onde é imprescindível um rigoroso controlo. Os testes são efetuados através da instalação de sensores de humidade e de um sistema de armazenamento de dados, para que seja exequível o envio da informação da medição, em tempo real, a qualquer computador ou aplicação móvel. O processo de monitorização, ao permitir a deteção de valores críticos de forma praticamente imediata, proporciona uma maior durabilidade a longo prazo da envolvente do edifício, uma vez que os problemas são detetados antes de assumirem proporções demasiado avançadas.

Atualmente, face à competitividade existente na indústria da construção, gestão de prazos e custos, os intervenientes envolvidos, são pressionados com ritmos de trabalho alucinantes. Assim sendo, verifica-se uma tendência na escolha de materiais mais baratos e de menor qualidade. Muitas das vezes recorre-se á subcontratação excessiva, sem que a qualidade e valia técnica dessa subcontratação seja um fator preponderante na escolha. Verifica-se ainda um desinvestimento nos controlos dos teores de humidade, não se respeitando os tempos e condições de secagem de certos materiais. Face a estas situações, habitualmente, surge um custo acrescido, isto é, o custo da não qualidade.

## 1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIA

A presente dissertação tem como principal objetivo a sensibilização dos intervenientes da construção, não só para a importância da medição do teor de humidade, como também para a necessidade de colmatação das carências desta área, nomeadamente, no que concerne à investigação dos valores de referência de materiais de construção, à adoção de procedimentos padronizados de métodos de medição de humidade e à indispensabilidade de saber interpretar os resultados obtidos. Com esse intuito, este

documento pretende explorar a forma de medir humidade, através de uma exposição exaustiva dos métodos e técnicas disponíveis, determinando os métodos mais indicados para os materiais correntes de construção, os respetivos valores de referência para possível comparação e fácil perceção do estado dos mesmos (húmidos ou secos). Pretende-se ainda a familiarização com alguns equipamentos elétricos e procedimentos de ensaio para medições do parâmetro em causa, através de uma aplicação prática a dois casos de estudo. A estratégia de interpretação dos resultados obtidos advém da manipulação de uma ferramenta de cálculo (MATLAB) para mapear as respetivas zonas húmidas e assim perceber qualitativamente as distribuições de água nos elementos construtivos.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura da presente dissertação consiste numa hierarquização de capítulos na medida em que a informação transmitida seja sequencial, objetiva e de fácil interpretação. Assim sendo, a sua organização consiste em 5 capítulos com ligação sequencial entre si:

No capítulo 1, pretende-se para além da sensibilização dos agentes de construção para a importância da medição do teor de humidade na construção, enquadrar o leitor para os objetivos e estratégias utilizadas na presente dissertação.

No capítulo 2, elabora-se uma caracterização higroscópica dos distintos limites do teor de humidade possíveis de serem atingidos e respetiva apresentação desses valores aplicados a alguns materiais de construção correntes. São ainda apresentadas as diversas formas de manifestação de humidade;

No capítulo 3, faz-se uma descrição exaustiva de alguns métodos de medição do teor de humidade de aplicação laboratorial e *in situ*, através da descrição do princípio da técnica, dos equipamentos utilizados, a calibração dos equipamentos, dos procedimentos de ensaio e dos erros ou limitações do método. É ainda realizada uma síntese dos métodos na última parte do capítulo;

No capítulo 4, procede-se à adaptação de um programa de cálculo (MATLAB), para obtenção do mapeamento de distribuição dos valores de teor de humidade. Faz-se ainda uma aplicação a dois casos de estudo distintos em que se procedeu a medições *in situ* do teor de humidade e se produziu o respetivo mapeamento por via da referida ferramenta. Com base nos resultados gerados é desenvolvida uma análise crítica quanto à reprodutibilidade de resultados e sensibilidade dos equipamentos.

A parte final deste documento é reservada para a conclusão (Capítulo 5) na qual são tecidas, não só algumas considerações finais, como também sugestões de eventuais desenvolvimentos futuros.

## 2

## VALORES DE REFERÊNCIA DO TEOR DE HUMIDADE

## 2.1. INTRODUÇÃO

A definição do teor de humidade de um material e a interpretação dos distintos limites estabelecidos face à presença de humidade são fatores fundamentais para se perceber a importância da sua medição. Nesse sentido, apresenta-se uma listagem de dados com valores de referência de alguns materiais de construção correntes, visto que só é útil medir o teor de humidade se conhecermos estes parâmetros, de modo a que seja possível uma correlação com os valores reais. Assim sendo, podemos averiguar se um elemento construtivo encontra-se “seco” ou “húmido” para determinado fim.

Caso o limite de referência crítico ou seguro de um dado material seja ultrapassado, existe o risco de manifestações de humidade. Seguidamente abordam-se alguns tipos de manifestações, com o objetivo de enquadramento e interligação dos conceitos.

## 2.2. TEOR DE HUMIDADE

O teor de humidade é um indicador da quantidade de água presente num dado material, expresso em percentagem. Mediante a quantidade de água que um material contém, o teor de humidade pode ser determinado pelas relações seguintes [1]:

- Teor de humidade mássico ( $w$ ) - Relação entre a massa de água ( $m_e = m_h - m_s$ ) e a massa do material em estado seco ( $m_s$ ), expressa em kg/kg:

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100 \quad (1)$$

Em que:

$m_h$  – Massa da amostra húmida (kg)

$m_s$  – Massa da amostra húmida (kg)

- Teor de humidade em massa por unidade de volume ( $u$ ) - Relação entre a massa de água ( $m_h$ ) e o volume aparente no estado seco ( $V_s$ ), expressa em kg/m<sup>3</sup>:

$$u = \frac{m_h - m_s}{V_s} * 100 \quad (2)$$

Em alternativa através da expressão:

$$u = w * \rho_o \quad (3)$$

Em que:

$V_s$  – Volume da amostra seca ( $m^3$ )

$\rho_o$  – Densidade da amostra seca ( $kg/m^3$ )

- Teor de humidade volúmico ( $\theta$ ) - Relação entre o volume de água do material ( $V_e$ ) e o volume aparente do mesmo em estado seco ( $V_s$ ), expressa em  $m^3/m^3$ :

$$\theta = \frac{V_h - V_s}{V_s} * 100 \quad (4)$$

Em alternativa através da expressão:

$$\theta = w * \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (5)$$

Em que:

$\rho_w$  – Densidade da amostra húmida ( $kg/m^3$ )

## 2.2.1. NÍVEIS DE TEOR DE HUMIDADE

Os materiais de construção são normalmente porosos, o que implica que possuem três fases:

- Sólida (a estrutura do material);
- Líquida (água livre e de absorção contida nos poros);
- Gasosa (ar incluído nos poros).

Assim sendo, estes materiais podem adquirir moléculas de água por diferentes processos nomeadamente [1]:

- Adsorção (moléculas de água presentes no ar);
- Capilaridade;
- Contacto com água líquida
- Condensação do vapor de água contido na parte interna dos materiais.



Os materiais quando estão em contacto com moléculas de vapor de água têm tendência para retê-las devido à natureza polar das mesmas (fenómeno de adsorção). Mediante essa quantidade de água fixada aquando da variação da humidade relativa do meio, os materiais são mais ou menos higroscópicos e consequentemente o seu teor de humidade altera-se. Um material pode ser não higroscópico (como por exemplo materiais que não tenham poros internos: vidro, plástico e aço) caso a sua massa seja aproximadamente constante em relação às variações de humidade relativa do meio onde se inserem.

Assim sendo, o teor de humidade de um material higroscópico pode ser compreendido consoante a fase e domínio em que se encontra como se pode constatar com a imagem da Fig. 2.

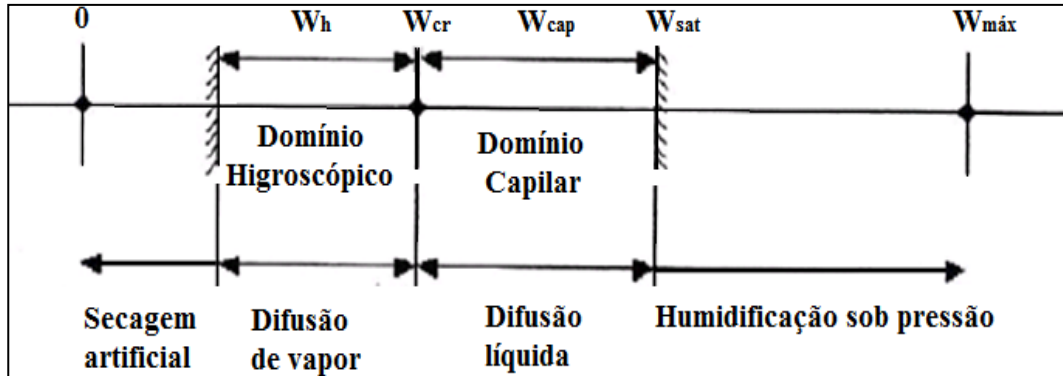


Fig. 2 - Níveis do teor de humidade do material (kg/kg) [2]

A percentagem do teor de humidade de um dado material é igual a zero, somente quando existe secagem com recurso a meios artificiais, uma vez que, não existe nenhum material com o referido teor na sua condição natural [2].

O teor de humidade correspondente ao domínio higroscópico está relacionado com a quantidade de água que um material possui quando se encontra em equilíbrio com a humidade relativa do meio, podendo variar do valor zero (caso a humidade relativa do meio seja zero) até ao limite crítico ou seguro [2].

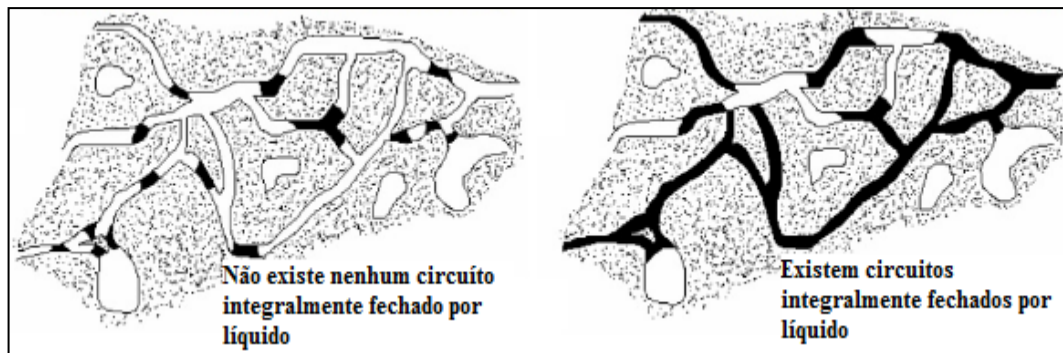


Fig. 3 - Representação de situações em que o teor de humidade é inferior ao crítico (imagem da esquerda) e onde é superior ao crítico (imagem da direita) [2]

Este limite crítico ( $w_{cr}$ ,  $\mu_{cr}$ ,  $\theta_{cr}$ ) é atingido quando o teor de humidade que um material possui, está em contacto com uma ambiência saturada cujo transporte por capilaridade (água líquida) não é praticamente possível [1]. Abaixo do referido valor, o transporte de humidade efetua-se somente na fase de vapor. Nas situações em que o teor de humidade de um material seja superior ao crítico, há probabilidade de risco de deterioração do mesmo [3]. O valor da humidade relativa correspondente ao teor de

humidade crítico é de 98 %, uma vez que a norma ISO9346 estabelece um intervalo de valores entre os 95% e os 98% (existem outras abordagens como por exemplo a norma ISO15148). Contudo, este valor depende do material em estudo, como por exemplo, no caso de madeiras e betonilhas cujo seu valor é 80% e 100%, respetivamente [3]. Este limite corresponde ao limiar entre o domínio higroscópico (0% até 98% de Hr) e o domínio capilar (superior a 98%).

Por sua vez, o domínio capilar tem como condições fronteiras o teor de humidade crítico e o de saturação, sendo que a massa do material sofre variações na presença de água líquida devido a fenómenos de capilaridade (mecanismo de fixação por sucção). A sucção é inversamente proporcional ao teor de humidade, sendo nulo quando o teor de humidade é máximo [4]. Assim sendo, o teor de saturação ( $W_{sat}$ ) está relacionado com a quantidade de água que um material pode conter na presença de água, num determinado período temporal [1], ou seja, diz respeito á máxima capacidade de absorção natural de água permissível.

Finalmente, o teor de humidade máximo só é alcançado quando o ar contido nos poros dos materiais (volume não ocupado pelo esqueleto sólido) é totalmente preenchido por água, cuja finalidade só é alcançável por humedificação sob pressão (absorção de água em vácuo) [2].

Em síntese, quando se está dentro do domínio higroscópico existem três etapas de fixação de vapor de água por adsorção devido às forças intermoleculares que atuam na interface sólido-líquido no interior dos poros, nomeadamente (Fig. 4) [1]:

- Adsorção mono-molecular caracterizada pela fixação de uma fina camada de moléculas de água na superfície dos poros;
- Fixações plurimolecular de várias camadas de moléculas de água sobre a primeira camada absorvida, onde as forças intermoleculares atuam também na interface líquido-líquido;
- Condensação capilar quando o diâmetro ( $d$ ) do poro é suficientemente pequeno, na ordem dos 2 a 20 nm ( $1\text{ nm}=10^{-9}\text{ m}$ ). Ocorre união das multicamadas de paredes opostas.

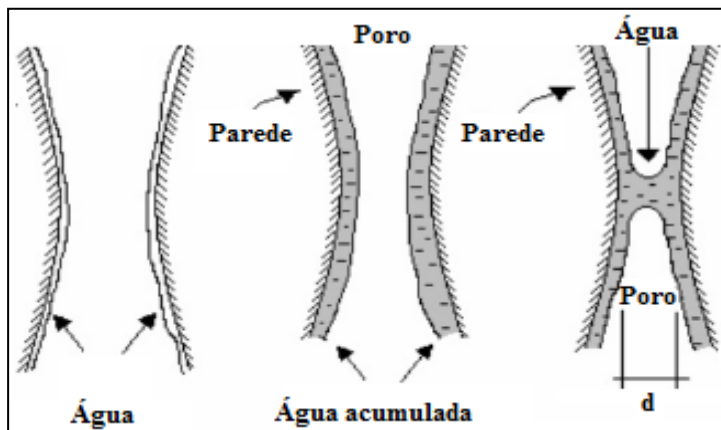


Fig. 4 - Etapas de fixação de vapor de água por adsorção no domínio higroscópico [1]

A higroscopicidade é a capacidade de um dado material fixar água por adsorção e de restituí-la ao meio em que se insere em função das flutuações de temperatura e humidade relativa. Assim, quando um material higroscópico está em contacto com uma ambiência de 0% a 98%, possui a capacidade de fixar moléculas de água no seu interior. Verifica-se adsorção de vapor água por parte do material sempre que a pressão no mesmo for inferior á pressão de vapor do meio ambiente em que se insere.

Quando se atinge o equilíbrio de ambas as pressões deixa de se verificar adsorção (domínio higroscópico) [5].

Deste modo, pode definir-se esquematicamente o comportamento higroscópico dos materiais em função da humidade relativa do ar com as respetivas etapas do processo de fixação de água por adsorção em materiais porosos.

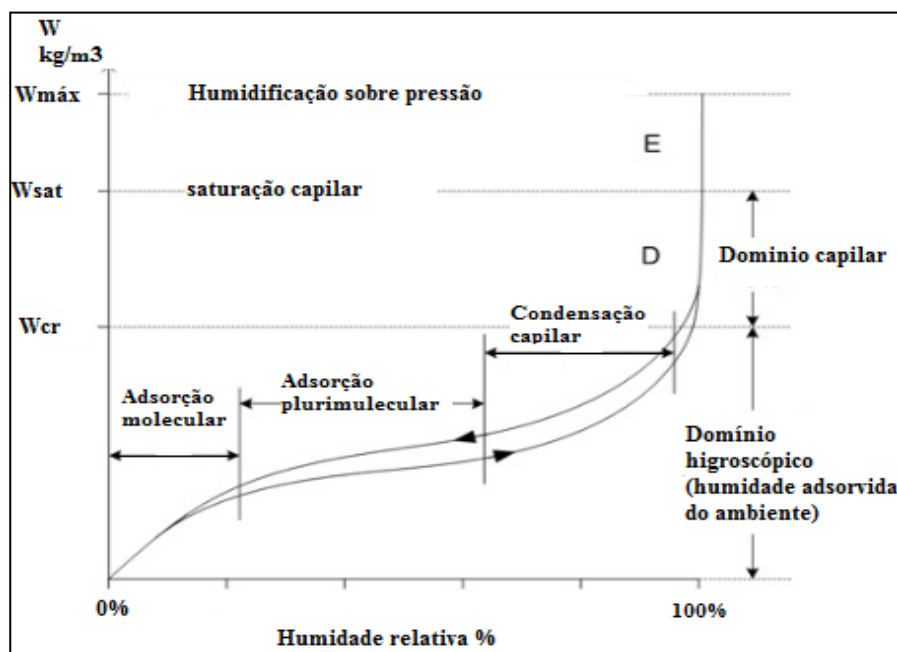


Fig. 5 - Curva típica de equilíbrio higroscópico de materiais porosos com respetiva definição do domínio higroscópico, capilar, o teor de humidade crítico ( $W_{cr}$ ), o teor de humidade de saturação ( $W_{sat}$ ) e o teor máximo de humidade de saturação nos poros ( $W_{máx}$ ) [2]

Como se pode constatar na Fig. 5, as curvas têm uma forma em S, sendo o ponto de inflexão, geralmente posicionado entre 30% e 70% de humidade relativa. Existe um fenómeno de histerese das curvas, devido à sua desigualdade, sendo o teor de humidade da curva de adsorção constantemente inferior à de desadsorção.

### 2.3. VALORES DE REFERÊNCIA

A determinação dos valores de referência dos materiais é essencial, uma vez que somente faz sentido medir o teor de humidade dos mesmos, se conhecermos estes parâmetros, pois sem eles, as leituras não têm significado prático. O conhecimento destes valores proporciona definir se um dado material ultrapassou certo nível de teor de humidade. Devido à concretização destes limites somente ser possível com recurso a aplicações experimentais, nomeadamente com recurso ao método gravimétrico, e à necessidade de concluir a presente dissertação num período temporal que não permite a realização dos mesmos, optou-se por fazer referência dos valores encontrados na literatura existente. Contudo, face à dificuldade presente na concretização destes limites, a lista de materiais estudados é reduzida.

O Quadro 1 traduz os níveis de teores de humidade que à priori são mais utilizados, nomeadamente: teor de humidade crítico ou seguro, de saturação e máximo.

Quadro 1 – Valores do teor de humidade dos materiais em kg/m<sup>3</sup>

Material	$u_{cr}$ kg/m <sup>3</sup>	$u_{sat}$ kg/m <sup>3</sup>	$u_{máx}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Betão [6]	100- 110	110	153	2176
Betão leve [6]	140 ( $\rho = 935$ )	97 – 190 ( $\rho = 872$ a 980)	584 ( $\rho = 973$ )	644 < $\rho$ < 1187
Betão celular [6]	$\pm 180$	109 + 0.383. $\rho$	972 - 0.350. $\rho$	455 < $\rho$ < 800
Betão celular [9]	-	340	-	600
Betão de Poliestireno [6]	-	-	489 ( $\rho = 422$ )	259 < $\rho$ < 792
Argamassa [6]	-	283	-	1050 < $\rho$ < 2200
Tijolo[6]	$\pm 100$	730- 0.287 $\rho$	1032- 0.4036 $\rho$	1505 < $\rho$ < 2047
Tijolo de silicatos [9]	-	275	-	1800
Pedra de areia de cal [6]	120( $\rho = 1807$ )	233	-	1685 < $\rho$ < 1807
Gesso [6]	-	310	-	975
Estuque [6]	-	185	-	830 < $\rho$ < 1760
Painel de aglomerado de partículas de resíduos de madeira [6]	600	-	-	570 < $\rho$ < 800
Madeira [6]	17.3 (Hr=80%)	26(Hr=0.98%)	-	400(pinho) < $\rho$ < 690(faia)
Contraplacado[6]	435	-	-	445 < $\rho$ < 799
Placa cimentícia de madeira [6]	180 ( $\rho = 360$ )	240 ( $\rho = 360$ )	-	314 < $\rho$ < 767
Fibrocimento [6]	350 ( $\rho = 840$ )	358( $\rho = 1495$ )	430( $\rho = 1495$ )	823 < $\rho$ < 2052
Cortiça [6]	60	-	-	$\rho > 1111$
Painel de Isolamento Perlite [6]	150-210	>550	-	135 < $\rho$ < 215

O quadro seguinte apresenta o teor de humidade higroscópico para humidades relativas de 50% e 80%:

Quadro 2 – Valores de teores de humidade dos materiais para humidades relativas de 50% e 80%

Material	Teor de humidade, Hr=50%		Teor de humidade, Hr=80%		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
	w (kg/ kg)	$\theta$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	w (kg/ kg)	$\theta$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	
Silicato de cálcio [7]	-	0,007	-	0,012	900 – 2200
Cortiça expandida [7]	-	0,008	-	0,011	90 – 140
Betão com agregados de pedra-pomes [7]	-	0,02	-	0,035	500 – 1300
Betão com agregados de poliestireno [7]	-	0,015	-	0,025	500 – 800
Betão com agregados de argila expandida [7]	0,02	-	0,03	-	400 – 700
Betão celular [7]	-	0,03	-	0,03	300 - 1000
Argila expandida [7]	0,026		0,045		200 – 400
Argamassa de alvenaria [7]	-	0,04	-	0,06	250 - 2000
Poliestireno expandido [7]	-	0	-	0	10 – 50
Poliestireno extrudido [7]	-	0	-	0	20 – 65
Poliuretano [7]	-	0	-	0	28 – 55
Tijolo de silicatos [8]	-		25	-	1900
Gesso [8]	-		6	-	850
PVC linóleo [8]	-		0	-	1000

## 2.4. MANIFESTAÇÕES DE HUMIDADE

Um elemento construtivo está constantemente exposto a possíveis fontes de humidade, estas que podem ter diferentes origens dependendo da agressividade de exposição a critérios climáticos adversos, do tipo de tecnologia construtiva adotada, do tipo de materiais aplicados e do tipo de metodologias de utilização.

As formas de manifestação de humidade podem ser categorizadas em:

- Humidade de construção;
- Humidade de infiltração/precipitação;
- Humidade superficial;
- Humidade de condensação interna;

- Humidade ascensional;
- Higroscopicidade dos materiais;
- Causas fortuitas.

#### 2.4.1. HUMIDADE DE CONSTRUÇÃO

A humidade de construção diz respeito ao excesso de água que os materiais possuem na conclusão da fase de execução devido á admissão de água durante o período de construção.

Na construção corrente a água está presente, tanto na composição da maioria dos materiais, como nos respetivos processos de construção (por exemplo: composição de betão, argamassa (Fig. 6), humedificação de tijolos na fase de assentamento (Fig. 7)). Associadamente aos fatores anteriores, durante a construção grandes quantidades de água de precipitação são introduzidas nos elementos de construção sem que estes possuam ainda os respetivos revestimentos e proteções apropriadas. A água introduzida, primeiramente, vai sofrer evaporação imediatamente após a execução e durante um curto período de tempo. Numa segunda fase, sofre evaporação lenta da água contida nos poros de maiores dimensões. Por último, a evaporação torna-se mais lenta, pelo que ocorre nos poros de pequenas dimensões [2].



Fig. 6 - Excesso de água em argamassas [10]



Fig. 7 - Molhagem excessiva do tijolo (assentamento) [10]

#### 2.4.2. HUMIDADE SUPERFICIAL

As condensações superficiais ocorrem quando massas de ar entram em contacto com uma superfície do elemento construtivo, na qual a temperatura é inferior à temperatura de orvalho.

É possível determinar a temperatura superficial interior através da seguinte expressão [2]:

$$\theta_{si} = \theta_i - U * R_{si} (\theta_{si} - \theta_e) \quad (6)$$

Em que:

$\theta_{si}$  - Temperatura superficial interior

$\theta_i$  - Coeficiente de transmissão térmica

$U$  - Resistência superficial interior

$\theta_e$  - Temperatura exterior.

Através do diagrama psicométrico é possível obter a pressão parcial de vapor interior se conhecermos a temperatura e humidade relativa interior. Constata-se que só se verificam condensações quando a temperatura superficial interior é inferior á temperatura de saturação (ponto de orvalho) para uma dada humidade relativa.

As existências de condensações superficiais dependem de vários fatores nomeadamente [10]:

- Isolamento térmico de reduzida espessura ou inexistência do mesmo;
- Ventilação pouco eficiente;
- Materiais de revestimento higroscópicos;
- Elevada produção de vapor.

#### 2.4.3. HUMIDADE DE CONDENSAÇÃO SUPERFICIAL INTERIOR

Esta vertente de manifestação de humidade caracteriza-se pela ocorrência de condensações internas, ou seja, no paramento interior dos elementos construtivos. O fenómeno referido tem grande probabilidade de ocorrência quando existe arrefecimento de uma massa de ar abaixo da temperatura de saturação (correspondente ao limite de saturação definido no diagrama psicométrico) originando o aparecimento de condensações [1].

Consoante as propriedades do isolamento térmico (caso exista) e de permeabilidade ao vapor de água dos vários constituintes do material, a temperatura no interior do elemento construtivo vai ser fortemente condicionada [1].

Como podemos constatar pela análise da Fig. 8 quando a humidade relativa do interior e do exterior são idênticas, a pressão instalada e de saturação são constantes pelo que não se verifica risco de condensações. Quando existe um gradiente de temperatura, é possível obter-se a curva de pressões em função da temperatura instalada, e caso coincida com a curva de pressões instaladas ocorre condensações.

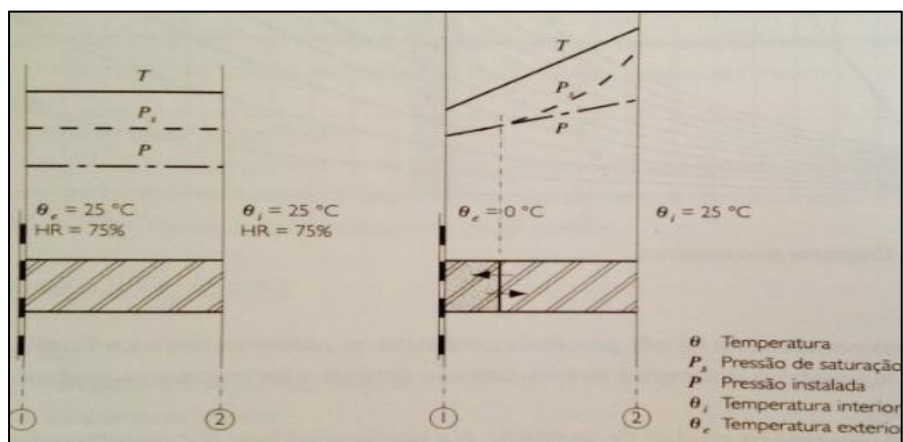


Fig. 8 - Esquema representativo de dois elementos construtivos idênticos sujeitos a diferentes condições de Temperatura, humidade relativa e pressões interiores e exteriores distintas. Na situação da esquerda todas as variáveis mantêm-se constantes, no caso da direita existe gradiente de temperatura e variações de humidade relativa e de pressão [1]

A quantificação do risco de condensações internas é normalmente realizada com base no modelo de Glaser. Hoje em dia já se recorre frequentemente a modelos de simulação e calculo (tais como: Wufi, Glasta, Condensa 13788 e Condensa 2000) baseados em algumas das seguintes normas [11]:

- DIN4108
- BS 5250
- CEN TC89- EN13788
- REEF
- NBE CT79

As consequências do efeito de condensação, normalmente, são manchas pretas na face interior das paredes, nos cantos dos compartimentos correspondentes a cunhais de edifícios e nas áreas próximas de vãos (Fig. 9) e elementos estruturais não aparentes (Fig. 10). Este fenómeno é intensificado em locais com elevada produção de vapor (cozinhas, quartos de banho, quartos com fraca insolação)



Fig. 9 - Condensação num vão envidraçado [10]





Fig. 10 - Condensação em elementos estruturais não aparentes [10]

#### 2.4.4. HUMIDADE ASCENSIONAL

Este tipo de manifestação de humidade normalmente sucede, de uma forma mais acentuada, quando um elemento construtivo constituído por materiais porosos está em contacto (direto ou indireto) com água em estado líquido (geralmente devido ao contacto com solos húmidos), uma vez que, se reúnem condições propícias ao fenómeno de ascensão capilar. A capacidade de absorção capilar depende das propriedades de humificação dos grãos sólidos de proporcionar a existência de interfaces curvas entre a água e o ar contido nos poros. No interior dos poros gera-se um gradiente de pressão e desenvolve-se uma pressão capilar (sucção) que varia com a temperatura e teor de humidade [1].

Como consequência desse fenómeno verificam-se anomalias que resultam na detioração dos elementos construtivos, nomeadamente:

- Deslocamento de revestimento (cerâmicos, contraplacados);
- Degradação de revestimentos (manchas, empolamento e destacamento) geralmente numa cota próxima do piso térreo (com uma altura variável) (Fig.11);
- Aglomeração de sais nos elementos construtivos devido à dissolução da água ascensional e frequente criação de eflorescências;
- Ambiente propício a fenómenos de insalubridade e desconforto.

Estas manifestações são geralmente frequentes quando se conjuga uma situação de presença de água em materiais porosos (alvenaria de pedra, betão, argamassa, alvenaria de tijolo) e a ausência de corte hídrico (impermeabilização superficial das fundações, barreira estanque ou injeção da base da parede com produtos hidrófobos) ou deficiente tecnologia construtiva (elementos não ventilados ou de difícil evaporação de água). A presença de água pode ter origem de água advinda do nível freático de cota elevada em que os materiais possuem elevada absorção de água da chuva (acumulada no solo) e no solo através de água acumulada em superfícies de drenagem, como por exemplo: valetas, canais de drenagem, pavimentos com pendente para escoamento de água.

As cotas de ascensão capilar dependem de vários fatores, tais como:

- Quantidade de água em contacto com o elemento (Fig.13);

- Condições de evaporação da estrutura (temperatura e humidade relativa);
- Orientação (relacionada com a precipitação incidente e secagem);
- Presença de sais (cristalização/dissolução);
- Espessura do elemento construtivo (quanto maior a espessura, maior a altura atingida pela água);
- Porosidade do elemento construtivo (relaciona a quantidade de vazios com o volume aparente do material e quanto maior a ligação entre poros maior a humedificação da parede e maior a cota de ascensão);
- Porometria do elemento construtivo (relacionada com o diâmetro dos poros, pois quanto menores maior a cota de ascensão).
- Revestimentos impermeáveis potenciadores de ascensão capilar devido à dificuldade de evaporação do elemento construtivo [2] (Fig.12).

Estas manifestações incidem maioritariamente em elementos com elevada capacidade de absorção (alvenaria de pedra, betão, argamassa, alvenaria de tijolo) e em soluções com as seguintes tecnologias construtivas:

- Pavimentos assentes em terrenos de fundação;
- Fundações não revestidas com materiais impermeáveis (ausência de corte hídrico).



Fig. 11 - Parede com manifestação de humidade ascensional [10]



Fig. 12 - Parede com manifestação acentuada de humidade ascensional devido ao revestimento cerâmico funcionar como um impermeabilizante parcial [10]



Fig. 13 - Parede com manifestação de humidade ascensional devido a pendente (degraus) para a parede exterior [10]

#### 2.4.5. HUMIDADE DE INFILTRAÇÃO/ PRECIPITAÇÃO

Esta manifestação de humidade é originada devido a um conjunto de fatores, nomeadamente:

- Percolação de água e respetiva infiltração através de zonas de fissuras (revestimentos com elevada capacidade de absorção);
- Infiltração de água da chuva por elementos do edifício devido a: conceção ou execução menos conseguida (Fig 14), falta de manutenção, fissuração, degradação de revestimentos, remates mal executados e deficiente ligação da fachada com a caixilharia [2].

É de notar que este tipo de manifestações são fortemente agravadas devido ao facto da precipitação não ser um fenómeno isolado, isto é, a presença praticamente constante da pressão do vento faz com que a trajetória da água passe a ter uma componente horizontal acentuada aumentando o risco de humedificação do paramento interior do elemento.

A localização geográfica e orientação são fenómenos que podem acentuar a referida manifestação.

Geralmente as anomalias resultantes prendem-se com o aparecimento de manchas de humidade nos paramentos interiores, com localização aleatória, contudo, mais frequentemente nas proximidades de vãos de portas e janelas e fissuras.



Fig. 14 - Infiltração pontual por deficiente fixação do tubo de queda [10]

#### 2.4.6. HUMIDADE DE HIGROSPICIDADE DOS MATERIAIS

Este tipo de manifestação de humidade está relacionado com o comportamento dos materiais, nomeadamente na capacidade de cada material acumular água por adsorção e respetiva restituição da mesma ao ambiente em que se encontra, dependendo das variações de humidade relativa desse ambiente.

Quando os materiais higroscópicos estão sujeitos a uma humidade relativa entre 65% a 75% e estão em contacto com água contendo sais dissolvidos, estes facilmente migram até à superfície interior onde cristalizam sob forma de eflorescências (cristalização à superfície) ou cripto fluoescências (cristalização sob o revestimento da parede), quando a humidade relativa baixa [10]. A presença dos sais provoca humedecimento das superfícies e, consequentemente, a deteriorações dos materiais por expansão do volume.

As anomalias resultantes desta categoria de manifestação de humidade geralmente identificam-se pela existência de manchas de humidade em áreas de elevada concentração de sais higroscópicos e pela destruição dos revestimentos das paredes devido à concentração desses sais [10].

#### 2.4.7. HUMIDADE RESULTANTE DE CAUSAS FORTUITAS/ACIDENTAIS

Manifestações de humidade derivadas de situações ocasionais resultantes de infiltração de água de origem pontual. Desta forma, estas fugas de água pontuais podem corresponder a:

- Defeitos de construção (Fig.15);
- Funcionamento de equipamentos e sistemas;
- Responsabilidade humana ativa (acidentes) ou passiva (falta de manutenção).

Por vezes, o facto de a água ter uma elevada probabilidade de migração da origem da fuga, constituiu uma dificuldade extra no diagnóstico e avaliação do tipo de manifestação.

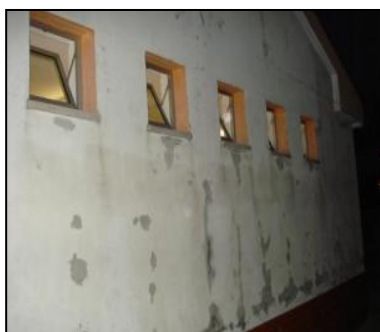


Fig. 15 - Infiltração devido a rotura de canalizações [10]

## 3

## MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE

## 3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos exhaustivamente alguns métodos de medição do teor de humidade. Assim sendo, para cada método aborda-se o seguinte:

- Princípio do método;
- Equipamentos necessários;
- Calibração do equipamento;
- Procedimento de ensaio e eventuais erros.

## 3.2. MÉTODO GRAVIMÉTRICO

## 3.2.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

O método gravimétrico baseia-se na submissão de uma amostra previamente recolhida nas condições verificadas *in situ*, a um processo de pesagem, secagem em estufa ventilada e nova pesagem da amostra “seca” (depois de esta ter sido sujeita ao processo de secagem). É um método destrutivo, normalmente aplicado em laboratório. A perda de massa resultante da evaporação é comprovada pela diferença das pesagens da massa da amostra nas condições *in situ* e da amostra submetida a secagem. A seguinte fórmula providenciada pelas normas existentes para calcular o teor de humidade num dado material, corresponde á razão entre a diferença das massas referidas anteriormente e a massa da amostra no estado seco:

$$w = \left( \frac{m_h - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

Em que:

- $m_h$  - Massa da amostra “molhada”, ou seja, com as características recolhidas *in situ* (kg)
- $m_s$  - Massa da amostra “seca”, isto é, após secagem em estufa (kg)
- $w$  - Teor de humidade em percentagem (%)

A fórmula exposta anteriormente é expressa em percentagem da massa final (seca) da amostra

No entanto, em situações em que o material em estudo tenha um tratamento químico não volátil e se a massa do mesmo for conhecida, o teor de humidade deve ser determinado pela seguinte fórmula:

$$w = \left( \frac{m_h - m_s}{m_d} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Em que:

$m_d$  - Diferença entre a massa da amostra “seca” ( $m_s$ ) e a massa química retida na amostra.

Pela análise da fórmula supracitada anteriormente, chega-se à conclusão que um material pesado tem muito menor percentagem de teor de humidade do que um material leve que tenha precisamente a mesma quantidade de água. Podemos então afirmar que o método gravimétrico é independente da forma como a água é distribuída dentro do material. Como resultado dessa situação, a argamassa de cal considera-se em estado seco com um teor de humidade de cerca de 5% a 6% (em percentagem de massa), ao invés da argamassa de cimento que a 5% considera-se “molhada”. Alguns tijolos consideram-se secos a 2%, enquanto outros estão molhados a 2% e a maioria dos gessos são considerados molhados a 1%. Pode-se comprovar esta situação pela análise da Fig. 16, sendo que, materiais distintos encontram-se em situações de risco para diferentes teores de humidade [11]:

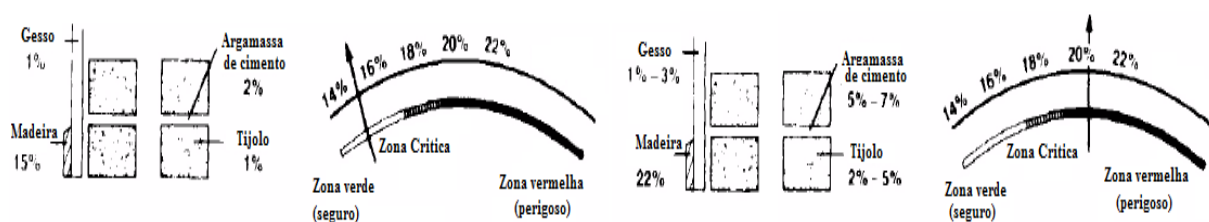


Fig. 16 - Este diagrama ilustra os diferentes teores de humidade para diferentes materiais de construção, todos em equilíbrio. O exemplo à esquerda e à direita mostra a condição seca (seguro) e molhada (perigoso), respetivamente [11]

A definição do teor de água significa somente a quantidade de água possível de ser extraída da amostra por secagem, a temperatura controlada e constante até que o material atinga o equilíbrio [11]. Assim sendo, significa que o material terá perdido todo o seu teor de humidade ou necessita de temperaturas mais elevadas, de modo a libertar mais moléculas de água. Contudo, materiais instáveis sujeitos a esse aumento de temperatura e/ou baixa humidade relativa, estão sujeitos a desidratação lenta de minerais hidratados e decomposição de materiais orgânicos [12].

Este método pode ser aplicado a quase todo o tipo de materiais com um grau de precisão bastante satisfatório, desde que, na sua composição não existam componentes voláteis. Desta forma, o teor de humidade obtido constitui uma leitura absoluta, que nos dá valores precisos, quantitativos e passíveis de serem reproduzidos.

## 3.2.2. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

Implícito ao método gravimétrico, há a necessidade de recolha, preservação e armazenamento de amostras, de modo a garantir que ensaios posteriores traduzam resultados com base em condições verificadas no momento da coleta. Para garantir a satisfação da premissa anterior, aconselha-se o uso de alguns utensílios, tais como:

- Berbequim com sensibilidade suficiente para ser manuseado a baixas rotações ou brocas de aço galvanizado, e/ou escopro e martelo [13];
- Recipientes plásticos com tampa estanque ou saco estanque, portanto, ambos com condições herméticas de modo a não perderem nem adquirirem humidade desde o momento da recolha até ao momento da aplicação do método propriamente dito. Estes recipientes são normalmente sacos de polietileno,

Os equipamentos utilizados em laboratório para aplicação do método propriamente dito são:

- Balança com uma precisão não inferior a 1 mg. A precisão mínima da balança deve ser determinada pelo nível de precisão desejado do teor de humidade consoante a massa da amostra, como podemos constatar no Quadro 3. Para outros valores de massa da amostra, a exigência de sensibilidade deve ser dimensionada com a mesma proporção.

Quadro 3 – Precisão da balança consoante a precisão do teor de humidade desejado [13]

Precisão do teor de humidade desejado (%)	Precisão da balança (mg)
0.01	1
0.05	5
0.1	10
0.5	50
1.0	100

- Recipiente não corrosível, com dimensões suficientes para conter a amostra;
- Estufa ventilada, munida de um controle termostático que garanta a temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  constante [13].



Fig. 17 - Balança de precisão de 1mg com estrutura de vidro, para limitar a influência de poeira e fluxos de ar na medição e estufa ventilada [11]

No caso de o método ser aplicado *in situ* é necessário uma termo balança portátil (Fig. 18), contudo, não é aconselhado a sua aplicação no local, devido há facilidade com que os resultados são afetados, nomeadamente por:

- Pouca experiência do operador, no que diz respeito a ajuste de parâmetros e manipulação da amostra;
- Alta sensibilidade da balança que é facilmente influenciada pelo vento, inclinação e vibrações.



Fig. 18 - Termo balança portátil para aplicações do método gravimétrico no local (L. Miedema, 2014)

Outro forte motivo dissuasor é o tempo necessário para secar cada amostra separadamente [14].

### 3.2.3. CALIBRAÇÃO

A balança deve ser calibrada antes da sua primeira utilização diária ou sempre que se verifiquem alterações das condições de utilização, de modo a obter-se resultados fidedignos. Devido à sua elevada sensibilidade, a utilização da mesma deve ser realizada num ambiente fechado e neutro, de modo a evitar variações de temperatura, humidade, correntes de ar, exposição direta à luz solar e vibrações.

Aquando da calibração, o prato da bandeja deve estar vazio e devidamente limpo. Aconselha-se ainda a verificar a presença do valor zero mostrado no visor da balança. No caso de não se verificarem as condições anteriores, a balança deve ser tarada, zerada e calibrada com recurso a pesos padrão.

Embora as normas europeias não esclareçam, entre os vários métodos para medição do teor de humidade, qual o mais aconselhado, as normas ASTM reconhecem o método gravimétrico como o mais preciso e recomendam-no como referência de calibração dos restantes [15].



### 3.2.4. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento de ensaio é determinante para evitar alguns desvios de resultados, e revela-se essencial para padronizar a obtenção dos valores de humidade dos materiais. Deste modo, segue-se uma sugestão de procedimento a adotar:

- Primeiramente as amostras deverão ser recolhidas de acordo com o especificado anteriormente no capítulo “recolha de amostras”. Desta forma, dependendo do material e da precisão da balança usada, uma amostra não inferior a 1 g, é retirada da estrutura à profundidade desejável;
- A amostra contida dentro do saco (ou garrafa) de polietileno fechado hermeticamente, deve ser colocada numa cápsula de vidro e pesada como um conjunto, devido à possível absorção de humidade externa ou evaporação durante o período temporal desde que a amostra é embalada até que é pesada. A massa do recipiente e da cápsula de vidro deverá ser igualmente pesada (ou fornecida pelo fabricante);
- Coloca-se a amostra numa estufa ventilada, submetida a uma dada temperatura constante. A temperatura deve ser controlada consoante o tipo de material em estudo. Como referido anteriormente, e de acordo com

Quadro 4 – Temperatura de secagem (°C) em estufa aconselhada de acordo com o material

Materiais	Temperatura de secagem em estufa (°C)
Materiais hidratados (ex.: gesso)	40 ± 2°C
Madeiras	103 ± 2°C
Betão	103 ± 2°C
Argamassa	103 ± 2°C

- As amostras que sejam compostas por materiais instáveis devem ser sujeitas a temperaturas menos elevadas. Para estes materiais sensíveis, estabelece-se que temperaturas na ordem dos 40°C não serão abrasivas. A temperatura adotada para a estufa vai depender do tipo de material em estudo, pois temperaturas demasiado elevadas vão provocar a evaporação da água livre e da água de ligação [16];

Quadro 4 – Temperatura de secagem (°C) em estufa aconselhada de acordo com o material

Materiais	Temperatura de secagem em estufa (°C)
Materiais hidratados (ex.: gesso)	40± 2°C
Madeiras	103 ± 2°C
Betão	103 ± 2°C
Argamassa	103 ± 2°C

- No momento em que a amostra tenha perdido uma quantidade de massa igual ou menor que duas vezes a sensibilidade escolhida para a balança, em intervalos de 3h, assume-se que a amostra perdeu todo o seu teor em água. A título de exemplo e de acordo com o Quadro 3, para uma amostra de 10g, caso a precisão do teor de humidade desejável seja 0.01 %, a sensibilidade da balança deverá ser de 1mg. Deste modo, considera-se que a amostra perdeu todo o seu teor de água, possível de ser extraído por secagem, quando atingir uma perda de 2mg;
- As amostras “secas” devem ser armazenadas num dessecador até atingirem a temperatura ambiente e dessa forma impedidas de alterarem o seu teor em água [13];
- Pesa-se a em conjunto a amostra “seca” contida no dessecador fechado;
- Registrando os dados das pesagens obtidas, conseguimos proceder ao cálculo do teor de humidade, do material em estudo, pela utilização da expressão (6).

O procedimento do método gravimétrico pode ser adotado de acordo com alguns documentos, nomeadamente normas e guias de aplicação da técnica, tais como:

- EN 13183-1:2002 – Moisture content of a piece of sawn timber – Part 1 : Determination of oven dry method;
- CEN/TC89 N338E (1994) - Building material- determination of moisture content. Principles of Testing;
- CEN-EN ISO 12570:2000 - Higrothermal performance of building materials and products.
- BS EN 322:1993 -Wood-based panels. Determination of moisture content;
- DIN 18121-1 -Soil, investigation and testing – water content - Part 1: Determination by drying in oven;
- ASTM-Designation: D 4442 – 92 (Reapproved 2003) - Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials;
- ASTM-Designation: D 2216 – 98 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass;

- ASTM-Designation: D 4933-99, Guide for Moisture Conditioning of Wood and Wood-Based Materials;
- NP 614 (1973): Madeira. Determinação do teor em água;
- NP 1042 (1985): Cortiça. Aglomerados puros expandidos em placas. Determinação do teor de humidade;
- NP EN 1097-5:2002: Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 5: Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada;
- NP 606: Cortiça. Granulados de cortiça. Determinação da humidade.

### 3.2.5. ERROS DE MEDIÇÃO

No processo de recolha de amostras podem surgir alguns erros, uma vez que, existe grande influência da capacidade e experiência humana. Complementarmente, alguns desvios podem surgir devido a limitações do método, nomeadamente:

- A presença de substâncias voláteis (que não água) na amostra;
- Temperatura da estufa não adequada ao material da amostra. Por exemplo em reabilitação por vezes podemos não ter dados sobre as propriedades do material em estudo;
- Alterações das condições *in situ* da amostra, tanto no momento de recolha, como de armazenamento e transporte;
- Dificil aplicabilidade do método em materiais duros;
- Recolha de amostras recorrendo a furações prolongadas e de elevadas velocidades de rotação;
- Erros a calibrar a balança.

## 3.3. MÉTODO CARBONATO DE CÁLCIO

### 3.3.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

O método químico consiste na indução de uma reação química pela adição de uma quantidade específica de carboneto de cálcio ( $\text{CaC}_2$ ), que ao reagir com a água contida na amostra, liberta gás acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) em pressão (e volume) proporcional à quantidade de água [12]. Mais concretamente, por cada molécula de água consumida na reação, é formada a mesma quantidade de gás acetileno.

Desta forma, a reação química heterogénea, envolve um reagente sólido (carboneto de cálcio ( $\text{CaC}_2$ )) bastante sensível à presença de água independentemente do estado em que esta se encontre (líquido, sólido, gasoso). Como resultado dessa reação, produz-se gás acetileno altamente inflamável ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) no estado sólido e energia manifestada sob forma de calor, como se pode verificar [12]:



É necessário o contacto entre o reagente e a amostra em ensaio para que se inicie a reação anterior. No entanto, a intensidade do contacto entre os compostos da reação e a concentração dos mesmos determina a velocidade do aumento de pressão, isto é, no caso de existir contacto direto entre água à superfície no estado líquido e carboneto de cálcio, ambos com concentrações iguais, a reação é rápida e violenta. Pelo contrário, se o contacto acontecer com água no estado gasoso, em concentrações menores, ou com reduzida quantidade de água à superfície (contida somente no interior da amostra), o aumento de pressão é limitado pelo processo de deslocação da água e a reação é lenta. A água consu-

mida durante a reação é, somente, a água livre, isto é, não existe influência na água de ligação da amostra (água quimicamente hidratada). Como se pode constatar pela leitura da Fig. 19, quando uma ampola de carbonato de cálcio é colocada em contacto com água líquida destilada, o aumento de pressão (num intervalo entre 1 a 1.25 bar) ocorre em poucos segundos.

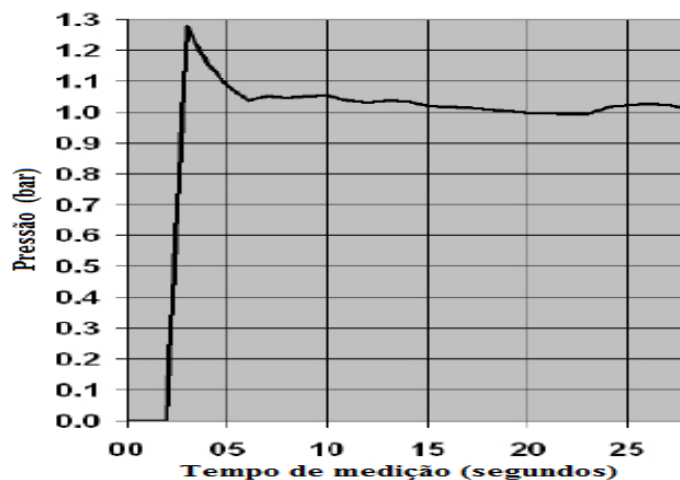


Fig. 19 - Medição da pressão (bar), em função do tempo decorrido (segundos), de uma reação química entre o carbonato de cálcio( $\text{CaC}_2$ ) e água líquida destilada( $\text{H}_2\text{O}$ ) [12]

O fim da reação ocorre quando a mesma atinge o equilíbrio, ou seja, quando quase todo o carbonato de cálcio ou quase toda a água “livre” são consumidos. O termo “quase” é aplicado, uma vez que, numa reação química, uma parte residual das substâncias iniciais permanecem num sistema fechado (como é o caso da garrafa de pressão). Quando se atingir o equilíbrio e a pressão se mantiver constante, esta pode ser medida através de um manómetro anexado ao recipiente de pressão onde a reação química é realizada. Relacionando a variação de pressão gerada, com as curvas de calibração de um dado material, obtemos o teor de água [12].

### 3.3.2. EQUIPAMENTO

O material utilizado para recolha de amostras e preparação do provete, é idêntico ao utilizado para o método gravimétrico.

Os equipamentos necessários para a realização do método, *in situ* ou em laboratório, são normalmente adquiridos em conjunto e armazenados numa maleta de transporte (Fig. 20), tais como os seguintes [12]:

- Recipiente (garrafa) de pressão, metálico (Fig. 20), estanque, e com um volume não inferior a 650 ml de acordo com a diretiva 97/23/EC, munido de um manómetro (mecânico ou digital), anexado ao recipiente de acordo com a norma EN 837 -2 (máximo erro absoluto de 25mbar);
- Balança digital com precisão não inferior a 0.1g. Em alternativa, pode-se utilizar uma balança mecânica;
- Ampolas com carbonato de cálcio, com uma massa de enchimento possível de aproximadamente 7 g (+/- 0.5g) e granulação de 0.7 a 1.0 mm de acordo com DIN 118560-4;
- Ampolas de controlo que contêm água destilada, aproximadamente de 1mg;

- 4 Esferas de aço (fornecidas pelo fabricante), de modo a favorecer a iniciação da reação pela mistura do reagente com os materiais sólidos e provocar o esmagamento do material;
- Juntas de reserva;
- Prato metálico com cerca de 75mm de diâmetro;
- Escova e pano, para limpeza dos utensílios;
- Peneiro, número 4 (4.75 mm), de acordo com requerimentos da norma ASTM D 4944 – 98 especificados em E 11 (utilizado em solos e agregados);
- Reagente carboneto de cálcio, finamente pulverizada, com facilidade em se combinar com a amostra e que garanta a produção de gás acetileno de pelo menos 0,14 metros cúbicos / kg;
- Sacos de polietileno;
- Cronógrafo;
- Termómetro de superfície;
- Equipamento de segurança, nomeadamente óculos de proteção. Como precaução adicional, é aconselhado o uso de uma máscara, roupa com mangas compridas e luvas, de modo a garantir a proteção do operador contra irritação da pele, olhos e sistema respiratório.



Fig. 20 - Equipamento de medição do método de cálcio carboneto: (1) garrafa de pressão de gás, (2) carbureto de cálcio ampola, (3) esferas de aço (4), manómetro [12]



Fig. 21 - Kit para o método de cálcio carboneto. (1) Garrafa de pressão com termómetro de superfície, (2) manómetro digital, (3) recipiente para armazenar a amostra, (4) escova de limpeza, (5) ampolas de carbonato de cálcio (6) utensílio para recolha de amostras, (7) etiquetas para rotular as amostras, (8) mala de transporte, (9) sacos de plástico estanques [12]

### 3.3.3. CALIBRAÇÃO

Antes de se proceder á calibração do equipamento, é necessário certificar que o recipiente está devidamente limpo, seco e que a junta não apresenta qualquer dano. Caso esta não esteja adequada ao uso deve ser substituída ( Fig. 22). As ampolas de controlo são usadas para rever a aptidão do manómetro e da junta, assim como a sua adequabilidade. As esferas de aço, a ampola de controlo (1g) e a ampola de carbonato de cálcio são ordenadamente e cuidadosamente colocadas na garrafa de pressão. Fecha-se a garrafa com o respetivo manómetro acoplado (Fig. 20). O conjunto deve ser agitado, pelo que as ampolas são quebradas e os reagentes libertados vão reagir. Esta reação normalmente está completa depois de 2 a 3 minutos e a pressão final depende da temperatura, isto é, deve ser 1 bar  $\pm$  0.05 bar para uma temperatura de 20 °C. Caso o valor da pressão medido no manómetro não esteja dentro do intervalo indicado pelo fabricante, a junta é substituída e o ensaio repetido. Se o valor da pressão continuar a apresentar valores não presentes no intervalo, admite-se que o manómetro é defeituoso.

Existe uma tolerância de 5% que inclui a variância de volume ( $\pm$ 1%), a tolerância da quantidade de água  $\pm$  1 %, a precisão do manómetro ( $\pm$ 2.0 %) e o possível desvio da temperatura de ( $\pm$ 1% por cada 3 °C de desvio dos 20 °C).

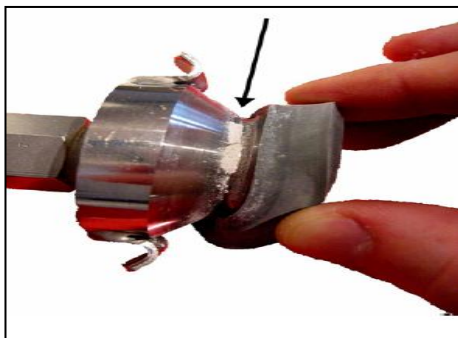


Fig. 22 - Junta desgastada e sinais de sujidade [12]

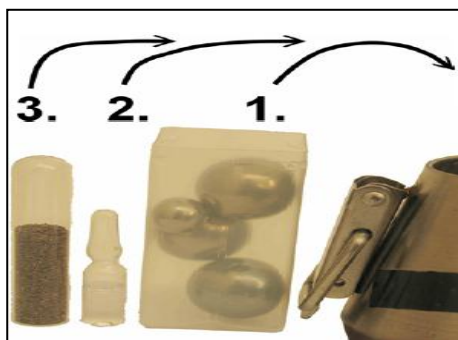


Fig. 23 - Sequência de colocação na garrafa de pressão no procedimento de calibração. (1) esferas de aço, (2) ampola de água destilada, (3) ampola de carbonato de cálcio [12]

### 3.3.4. PROCEDIMENTO

Primeiramente remove-se os fragmentos de material para serem testados, recorrendo á utilização do martelo e escopro ou berbequim, contudo o método de recolha não deve influenciar o teor de água do material.

Colocam-se os fragmentos diretamente num duplo saco de polietileno, ambos hermeticamente fechados. O manuseamento deve ser efetuado com luvas.

Com o martelo esmaga-se os fragmentos de maior dimensão para homogeneizar as variações de tamanho dos mesmos (por exemplo amostras de argamassa ou fragmentos de betão (Fig. 24). No caso de fragmentos de classes de resistência mais elevadas aconselha-se o uso de equipamentos elétricos para esmagamento. Os fragmentos devem ser preferencialmente inferiores a 10 mm. Este procedimento é realizado mantendo sempre a amostra dentro dos sacos fechados [12]. Este conjunto é pesado. Sabe-se o peso dos sacos herméticos.

Retira-se uma quantidade representativa da amostra para uma tina e pesa-se. A quantidade pesada depende do teor de água contido na amostra, de acordo com o Quadro 5, verifica-se que quanto menor é o teor de humidade, maior é a massa de amostragem necessária.

Quadro 5 – Quantidade de massa de amostra necessária consoante o teor de humidade assumido [16]

Teor de água assumido (%)	Quantidade de massa necessária (g)
1	100
2	50
5	20
10	10
20	5
30	3

Colocam-se as 4 esferas de metal e de seguida adiciona-se a quantidade de amostra necessária (inversamente proporcional á sua massa) na garrafa de pressão (Fig. 23).

Inclina-se o recipiente e introduz-se cuidadosamente a ampola de carboneto de cálcio sem que esta quebre. Procede-se ao fecho da garrafa de pressão.

Agita-se vigorosamente o recipiente de pressão de modo a estilhaçar a ampola de cloreto de cálcio. A reação química inicia-se com o estilhaçar da ampola. Os movimentos devem ser efetuados primeiramente na vertical e seguidamente em círculo, com uma duração de aproximadamente 2 min, para garantir que as substâncias não se fixam às paredes do recipiente de pressão. Ao agitar, é aconselhado que uma das mãos segure o fecho da garrafa de pressão. Depois de 5min, agita-se novamente durante 1 min [12].

Antes da leitura da pressão evidenciada pelo manómetro agita-se levemente durante 10 segundos.

A leitura do manómetro deve ser efetuada quando a pressão se mantiver constante, no entanto deve ser efetuado, normalmente ao fim dos primeiros 10 min. Esta leitura pode ser feita diretamente ou através da tabela de calibração. Usualmente para um manómetro mecânico clássico usa-se a escala azul, vermelha e preta, para uma quantidade de amostra de 20g, 50g e 100g, respetivamente. Para amostras que contenham maior teor de água (menor massa), utiliza-se a tabela de conversão presente no Quadro 6, na qual é necessário retirar o valor do teor de humidade em função da massa da amostra e da pressão final lida no manómetro, para uma determinada temperatura [17].

Quadro 6- Tabela de conversão para uma temperatura ambiente de 20°C (kg/kg) [17]

Pressão		Massa da amostra				
bar	3g	5g	10g	20g (verme- lho)	50g (verde)	100g (azul)
0.2	6.3	3.8	1.9	0.9	0.38	0.19
0.3	9.7	5.8	1.9	0.9	0.38	0.19
0.4	13	7.8	3.9	2	0.78	0.38
0.5	16.3	9.8	4.9	2.5	0.98	0.47
0.6	19.7	11.8	5.9	3	1.18	0.57
0.7	23	13.8	5.9	3	1.18	0.57
0.8	26.3	15.8	7.9	4	1.57	0.76
0.9	29.7	17.8	8.9	4.5	1.76	0.85
1	33.3	20	10	5	1.96	0.95
1.1	36.7	22	11	5.5	2.16	1.05
1.2	40	24	12	6	2.35	1.14
1.3	43.3	26	13	6.5	2.55	1.23
1.4	46.7	28	14	7	2.74	1.33
1.5	20	30	15	7.5	2.94	1.42
O Acetileno pode decompor e estragar o manómetro acima da pressão seguinte						
1.6	53.3	32	16	8	3.13	1.51

Depois de se registar a leitura da pressão, abre-se cuidadosamente a tampa do recipiente, despeja-se o conteúdo e limpa-se o recipiente com uma escova própria (seca) [17].

O procedimento do método de carbonato de cálcio pode ser adotado de acordo com a norma:

- DIN 18560-4:2011-03 - Estriche im Bauwesen - Teil 4: Estriche auf Trennschicht
- ASTM: Designation: D 4944 – 98 - Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester Method.





Fig. 24 - Procedimento de recolha de amostras para um saco estanque e respetivo esmagamento manual com recurso a um martelo de 1000g [12]

### 3.3.5. ERROS

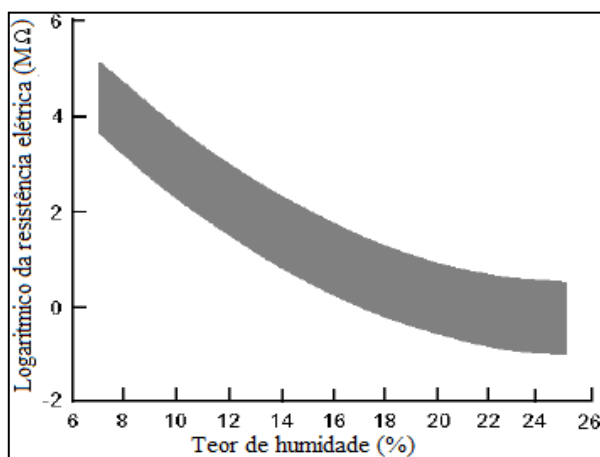
Alguns dos erros de procedimento e de calibração podem ter influência na veracidade dos resultados e conduzir-nos a interpretações de resultados, nomeadamente:

- A utilização de reagentes que não estejam devidamente fechados. Estes, por exposição com a atmosfera ou qualquer outra fonte de humidade, podem estar modificados em relação ao seu estado inicial, pelo que deve-se adquiri-los em pequenos recipientes munidos de tampa e armazená-los num lugar seco;
- Quando não se verifica suficiente pulverização, contacto e mistura de carboneto de cálcio e os materiais da amostra;
- Existe pouca heterogeneidade no tamanho das partículas, e na amostra existem fragmentos superiores a 10mm [12];
- Desconhecimento da composição do material. É aconselhado que se certifique que nenhum composto reage como o carboneto de cálcio (à exceção da água). Por exemplo, amostras que contenham metanol provocam uma reação com o carbonato de cálcio e alteram as quantidades e produtos resultantes da reação química;
- Juntas desgastadas e/ou a presença de alguma fuga na garrafa de pressão vai diminuir substancialmente a pressão gerada;
- O registo de pressão num momento temporal superiores a 20 minutos;
- Manómetro não calibrado, com defeito, ou não adequado para o ensaio devido ao erro máximo associado;
- Balança não calibrada ou não adequada no que diz respeito a precisão e fiabilidade para o ensaio em questão;
- As variações das condições de temperatura e volume, segundo a lei dos gases ideais, podem influenciar a pressão gerada e consequentemente a quantidade de água consumida;
- Experiência do operador, quer na parte de recolha de amostras, como também no processo propriamente dito;
- Se os equipamentos contiverem vestígios anteriores e não forem devidamente limpos, estes podem reagir com compostos do novo ensaio e alterar os resultados.

### 3.4. MÉTODO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

#### 3.4.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

O método da resistência elétrica baseia-se no princípio da dependência existente entre a resistência elétrica de um material e o seu teor em água. Os aparelhos que funcionam por condutância, medem predominantemente a condutância iônica entre dois pontos (elétrodos) quando aplicada uma determinada voltagem, geralmente contínua (corrente D.C). À medida que o teor em água contida no material aumenta, a sua resistência elétrica diminui e a sua condutividade aumenta. A correlação existente entre a resistência elétrica e o teor em água não é linear e tem de ser ajustada de acordo com a densidade,



temperatura e tipo de material ( Fig. 25).

Fig. 25 - Teor de humidade da Madeira (%) em função da resistência elétrica logarítmica (MΩ) medido a 27 °C. A área sombreada corresponde a 90% dos valores de teste (EUA FPL, 1982)

A resistência elétrica é uma propriedade dos materiais que varia com o teor de água, sendo esta relação fortemente correlacionada numa gama de valores entre 5% a 25% do teor de água, como se pode verificar no gráfico da Fig.27. Acima deste intervalo os resultados devem ser meramente indicativos.

Os aparelhos baseados na resistência elétrica são afetados pela temperatura e tipo de material. Usualmente, estes aparelhos medem indiretamente o teor de água através da produção de uma corrente elétrica contínua (D.C) originada pelo contacto ou introdução de um par de elétrodos (pinos) no material em estudo. Um dos elétrodos gera uma corrente elétrica, o outro, age como recetor e regista a resistência provocada pelo fluxo de corrente. Em alguns aparelhos a temperatura e o tipo de material são corrigidos internamente, outros são acompanhados por tabelas de correção.

#### 3.4.2. EQUIPAMENTO

Os equipamentos necessários para aplicação deste do método elétrico são:

- Aparelho elétrico para medições do teor de água baseado em medição da resistência elétrica. Normalmente são portáteis (Fig. 26) e de possível aplicação *in situ*. São aparelhos, usualmente munidos de duas sondas (dois elétrodos ou pinos), facilmente substituíveis e um mostrador para observação dos resultados [18];
- Aparelho elétrico munido de uma sonda termal capaz de ser introduzida dentro do material. A sonda térmica é utilizada para obtenção da temperatura do material com um maior grau de precisão.

- Para o caso de aparelhos que não possuam no seu sistema digital interno as conversões automáticas para os vários materiais, são necessárias tabelas de conversão específicas para cada material. Geralmente, existem conversões automáticas para algumas espécies de madeira, contudo, para outros materiais nem sempre é possível obter correlações com um grau de aproximação aceitável.
- Os aparelhos em questão, normalmente, conseguem fazer uma correlação para um intervalo de temperaturas, caso isso não se verifique, é necessário recorrer a tabelas de correções.



Fig. 26 - Equipamento Protimeter para medição do teor de humidade através dos 2 elétrodos (método de resistência elétrica) [19]

### 3.4.3. CALIBRAÇÃO

A calibração será realizada no próprio aparelho para testar a integridade do medidor e dos elétrodos. Para uma maior grau de precisão, os procedimentos laboratoriais de calibração destinam-se a estabelecer dados de referência sob condições controladas que incluem o tipo e temperatura do material e variáveis ambientais. A escala dos aparelhos de resistência é calibrada para medir o teor de água, com base no método gravimétrico, para um determinado tipo de material e temperatura de referência específica. As leituras de condutância são regra geral independentes da densidade relativa do material [13].

Nos testes de calibração *in situ*, os procedimentos de calibração utilizados por secagem são praticamente impraticáveis, especialmente devido aos gradientes de humidade. Os procedimentos adotados previamente em laboratório devem ser utilizados para desenvolver uma relação significativa entre a leitura do medidor e o teor em água do material. Os testes no terreno devem ser realizados apenas com um medidor que foi padronizado, onde se verifica a configuração de pinos e temperatura devidamente compensada. Inicialmente, a padronização deve ser realizada antes de cada período de utilização. O intervalo de tempo pode ser prolongado se a experiência revelar que um aparelho em particular é estável por um longo período temporal sob uso de condições equivalente.

O circuito do aparelho deve ser testado através da conexão das resistências externas nos elétrodos e avaliar o teor de humidade correspondente. Seguidamente compara-se os valores observados com os dados do fabricante. Pelo menos dois, mas preferivelmente três pontos serão utilizados para padronizar o aparelho.

O fornecedor do medidor deve indicar (no manual, na escala de calibração ou no próprio aparelho,) o modelo de medidor, os tipos de materiais estudados para calibração, e o número de elétrodos necessá-

rios para as quais as resistências medidas são válidas, a configuração do aparelho e a respetiva voltagem aplicada.

A Calibração laboratorial destina-se a calibração de larga escala do aparelho. Em qualquer caso, os valores obtidos por gravimetria não devem ser extrapolada para valores inferiores ao valor mais baixo. Os materiais devem ser preparados e testados de uma forma consistente e de acordo com os procedimentos de calibração laboratorial. Para o material madeira, os procedimentos laboratoriais a adotar são os seguintes [13]:

- Amostragem mínima de 75 espécies de madeira verde, de 20 mm espessura e 75 mm de largura e 100 mm de comprimento ao longo da nervura;
- Amostras sem defeitos, irregularidades, sujidade, decadência e concentrações de resina visíveis;
- As amostras são divididas em cinco grupos de quinze sendo cada grupo conservado, até ao momento do ensaio, em condições de temperatura de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  e humidade relativa compreendida num intervalos entre 7% a 21%;
- Cada grupo deve ser testado pelo método gravimétrico de acordo com os procedimentos descritos anteriormente.

É de notar que o tamanho e forma do material testado podem sofrer variações para que seja possível a realização do teste.

#### 3.4.4. PROCEDIMENTO

Pode existir recolha de amostras de material, no entanto, usualmente o teste é realizado diretamente *in situ* nas condições iniciais, de acordo com o procedimento seguinte [20]:

- Medição do teor de água do material no meio de cada face a uma distância não inferior a 5cm de cada limite de material. Quando não é possível, é aconselhado uma recolha de amostras;
- Selecionar áreas de medição aleatórias. O número de medições depende do tamanho das amostras. No caso da madeira pelo menos: duas áreas de medição para placas inferiores a 2.5m, três áreas para 2.5m a 4m e não menos de 4 medições para placas com mais de 4m. Estas áreas de medição não devem conter sujidade ou defeitos visíveis;
- Introduzir os elétrodos no material, caso seja madeira, é importante notar que a linha que une as pontas dos pinos deve ser alinhada ao longo do veio da madeira, isto é paralelamente aos veios. Nesta direção as variações do teor de água são menores. Os pinos são, normalmente, isolados ao longo do seu comprimento com apenas as pontas expostas para evitar medições alteradas. É sugerido que uma primeira medida seja realizada a uma profundidade média de 6mm e uma segunda de 25mm. Os valores são obtidos após 2 a 3 segundos de contacto entre os elétrodos e o material;
- No caso de materiais demasiado duros para se penetrar um elétrodos ( por exemplo: junta de argamassa, betão, pedra dura), deve existir uma furação prévia para introdução de elétrodos de maiores dimensões na profundidade desejada. O espaçamento de 25,4 mm corresponde ao espaçamento entre as sondas comuns. Para facilitar o procedimento, um bloco de aço (cerca de 25 x 50 mm e de 25 mm de espessura) pode ser utilizado como uma guia de perfuração para manter o espaçamento de 25,4 mm entre os dois. Posteriormente á furação os elétrodos são cuidadosamente colocados nos buracos;

- Realizar pelo menos três medições em cada área, espaçadas de 10 a 15 cm entre si, para evitar qualquer erro accidental, uma vez que pode existir defeitos interiores no material não perceptíveis;
- Assumir como resultado a média aritmética das três leituras mais próximas dos seus valores.

O procedimento do método de resistência elétrica pode ser adotado de acordo com a norma:

- EN 13183-2: 2002 “Moisture content of a piece of sawn timber- Estimation by electrical resistance method”.

### 3.4.5. ERROS

Alguns fatores influenciam as medições e consequentemente falseiam as leituras da resistência do material e respetiva correlação para o teor de água, tais como:

- A condutividade é afetada pela presença de substâncias eletrolíticas, tais como, iões derivados da dissolução de sais contidos no interior dos poros (pedra, betão, tijolos) ou cujo transporte dá-se por via de sucção capilar (o nível de acumulação de sais é mais elevado e variável) ou por outros mecanismos. Eflorescências afetam fortemente as medições, e provocam uma aparente humidade dependendo da concentração e tipo de sais presente [11];
- A temperatura do material e a temperatura do ar devem ser considerados na aplicação deste método porque a resistência elétrica diminuiu com o aumento da temperatura. Esta diminuição da resistência tem como consequência uma leitura mais elevada do teor de água, que deve ser compensada. Por exemplo, no caso da madeira, num intervalo de 30 °C a 50 °C, o efeito da temperatura resulta num aumento médio de 1.1 % do teor de água por cada 10°C de aumento de temperatura da madeira [21].
- O grau de saturação da madeira. Quando o teor em água aumenta de valores próximos de zero até valores próximos do ponto de saturação da fibra, a magnitude da resistência elétrica pode variar de  $10^3$  a  $10^4 \Omega \cdot m$  e  $10^{14}$  a  $10^{16} \Omega \cdot m$ , respetivamente. No entanto quando a estrutura de madeira fica completamente saturada o aumento de condutividade é irregular e menor, cerca de 100 vezes. O aparelho diminui a sua precisão devida a alterações mais pequenas da resistência elétrica. Contudo medições acima desse ponto já não têm especial interesse, uma vez que, o risco crítico de decadência foi excedido [22];
- A condutividade é afetada pelas fibras de orientação no caso da madeira;
- Medição na seção final dos materiais [23];
- Revestimentos com tratamentos químicos (por exemplo: retardantes da propagação de fogo, conservantes), podem alterar a condutividade. Prova disso é o exemplo do caso de estudo da adição de cera adesiva a uma placa de madeira. A densidade aparente é superior á madeira sem o tratamento. Neste caso, a medição do teor de água é cerca de 3 a 4 % inferior;
- Infecções bacteriológicas. Por vezes a resistência mecânica e a cor dos materiais não são afetados, mas a permeabilidade num determinado ponto é reduzida. Nessa zona específica as leituras do teor de água vão ser bastante elevadas contudo podem não ser leituras representativas da totalidade da amostra [10];
- Eléktrodo não isolados provocam medições mais elevadas [13];
- Eléktrodo mal encaixados ou partidos;
- Contacto entre os eléctrodo e o material;
- Gradientes não parabólicos;

- Natureza do material com propriedades desconhecidas, para a qual ainda não existe curva de correlação;
- Distribuição de humidade, profundidades de penetração e elevada humidade superficial [13-24].

### 3.5. MÉTODO ELÉTRICO DE CAPACITÂNCIA

#### 3.5.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

O método dielétrico consiste na medição do teor de humidade de forma indireta, na medida em que este teor depende da variação das propriedades dos materiais (constante dielétrica e fator de potencia) quando é imposto uma alternância de campo elétrico ao material [22]. A permissividade dielétrica reflete diretamente a força de resposta dielétrica de uma mistura de água / material, quando sujeita a um campo elétrico externo [25]. Esta constante dielétrica do material é essencialmente a relação entre a capacitância de um condensador contendo o material entre os condutores (elétrodos) e a capacitância do mesmo condensador contendo somente ar [26]. É, portanto, uma medida da quantidade relativa de energia que pode ser armazenada num condensador contendo o material. Esta relação é essencialmente uma medida de energia potencial por unidade de volume, armazenada no material sob forma de polarização elétrica aquando da indução de um campo elétrico [21].

Os equipamentos dielétricos geralmente são divididos em dois tipos. O primeiro é do tipo de capacitância, o qual utiliza a relação entre o teor de humidade e o da constante dielétrica dos materiais. O segundo é do tipo de fator de perda que utiliza a relação entre o teor de humidade e o fator de perda dielétrica do material. Os aparelhos de capacitância com base na variação da constante dielétrica são normalmente constituídos por dois elétrodos (discos metálicos) posicionados paralelamente no mesmo plano, sem se tocarem, de modo a que a eletricidade não seja transmitida diretamente de um para outro. Um dos discos possui uma carga positiva e o outro negativa, no entanto, é necessário uma indução de corrente elétrica. O material é invadido por um campo elétrico alternado é desenvolvido entre as placas condutoras (elétrodos), isto é, forma-se um condensador que é parte de um circuito oscilador. O oscilador do medidor fornece uma onda de frequência de rádio para o eletrodo transmissor. Em média, as profundidades de medição vão dos 3cm em madeiras, até aos 7cm no betão [26].

A frequência do circuito varia com as alterações de capacitância deste condensador, ou seja, com modificações na constante dielétrica do material. A razão entre a carga elétrica induzida e a diferença de potencial é a capacitância do sistema [26-27]. A capacitância como é proporcional à constante dielétrica do meio dielétrico, obtém-se o teor de humidade do material. A capacitância é função não só da área e do espaçamento dos discos paralelos (no mesmo plano) mas também da permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) e pode ser obtida teoricamente pela expressão matemática [28]:

$$C = \frac{\epsilon_v A}{d} \quad (10)$$

Onde:

- C - Capacitância,
- $\epsilon$  - Permissividade relativa do meio envolvente em que cargas são colocadas,
- $\epsilon_v$  - Permissividade relativa de vácuo,

- A - Área da placa paralela ( $\text{m}^2$ ),
- d - Distância entre as placas (m).

Quando em contacto com o ar a capacitância é muito pequena, no entanto quando em contacto com certos compostos a capacitância aumenta bastante. Sendo a capacidade do condensador armazenar a energia gerada entre os dois discos a propriedade medida pelos equipamentos, verifica-se que a água possui um valor de capacitância eléctrica cerca de 80 vezes a do ar, no entanto, para a generalidade dos materiais de construção o aumento é somente de duas a oito vezes [28]. Se esta capacitância for medida primeiramente com ar entre os discos, e depois num material molhado, o consequente aumento da capacitância é devido à água existente. Este efeito torna-se maior à medida que a frequência do campo eléctrico decresce. A capacitância também aumenta com o aumento da densidade e temperatura do material, exceto quando se verifica um elevado teor de humidade, onde o efeito torna-se irregular [27].

A energia armazenada num dieléctrico perfeito sujeito a um campo eléctrico, é recuperada completamente quando o campo é removido. Contudo dieléctricos reais não são perfeitos, e só parte da energia eléctrica armazenada é recuperada. A restante é perdida sob forma de calor. O fator de potência é a medida da proporção de energia armazenada que se perde. A energia total perdida depende da frequência do campo eléctrico, isto é, a taxa de carga e descarga do condensador. Também depende da quantidade de energia armazenada em cada ciclo, o que por sua vez depende da capacitância. O fator de potência de um material, em geral, aumenta com o aumento do teor de humidade, no entanto esta relação depende ainda da temperatura, frequência e densidade do material [27].

O fator de perda (produto do fator de potência pela capacitância), usualmente aumenta com o aumento do teor de humidade e com o aumento de densidade do material. Aparelhos baseados na medição do fator de perda operam através da aplicação de um campo eléctrico ao material. O oscilador de baixa potência irradia um campo eléctrico através dos eléctrodos. A potência absorvida pelo material é acumulada pelo mesmo e reduz a amplitude de oscilação. O teor de humidade depende do fator de perda. O medidor converte as leituras do fator de perda em leituras de teor de humidade [22].

### 3.5.2. EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados para aplicação do método de constante dieléctrica apresentam-se, seguidamente, listados:

- Equipamento medidor dieléctricos (Fig. 27), do tipo: capacitância (constante dieléctrica), perda de energia ou capacitância admissão. Cada um dos tipos tem um sistema de eléctrodos (condutores) que são parte integrante dos aparelhos, pelo que não são comutáveis entre os mesmos.
- Equipamentos montados manualmente para monitorização *in situ* possuem módulos semelhantes, no entanto os eléctrodos, são revestidos por uma película de plástico. O plástico sobre os eléctrodos atenua o efeito de "corrente" ou "humidade" excessiva na área entre os eléctrodos pois contribui de isolamento das placas condutoras. Assim, isolamos as propriedades dieléctricas do material. Sem a película plástica, o resultado era influenciado por altas concentrações de humidade superficial entre os eléctrodos, e um possível curto-circuito.



Fig. 27 - Equipamento de medição do teor de húmida, configurado no modo “pinless” (capacitância) [19]

### 3.5.3. CALIBRAÇÃO

Os aparelhos do tipo dielétrico não exigem uma correção da temperatura entre 0°C e 125°C.

A constante dielétrica aumenta quase linearmente com o aumento da densidade pois há uma ligeira tendência ascendente côncava à medida que o teor de humidade do material madeira aumenta [29].

As correções para os vários materiais devem portanto englobar as diferenças de densidade. A maior parte dos medidores dielétricos comercializados têm correções dos materiais incorporadas.

Um microprocessador converte a capacitância do material num comprimento de impulso e regista esse valor. Ao correlacionar a capacitância do material em teste com um material semelhante da base de dados cujos valores do teor em água foram obtidos por secagem em estufa, obtém-se o teor em água do material em teste [29]. Para correções de materiais não fornecidos na base de dados, será necessário determinar a gravidade específica média representativa do material, e ajustar o medidor de acordo. O usuário pode, então, avaliar o ajuste do tipo de material, comparando as leituras do medidor (usando o fator de peso específico medido) a partir de amostras representativas com teor de humidade determinados por secagem em estufa (método gravimétrico). Em alternativa, para variantes dos materiais da base de dados, geralmente utilizam-se tabelas contendo múltiplas equações de regressão linear para calcular as correções das variantes específicas de cada material [29].

### 3.5.4. PROCEDIMENTO

Para aplicação deste método sugere-se o seguinte procedimento:

- Calibrar o aparelho para o tipo de material a ser instalado antes de se proceder à medição;
- Fornecer um contacto firme e consistente com a superfície do material em teste para garantir a irradiação de ondas de frequência radio e criar um campo elétrico no material. A forma e tamanho dos elétrodo dependem do tipo de medidor, da aplicação, e da profundidade de penetração do campo elétrico que se pretende. As penetrações do campo elétrico podem variar de acordo com o tipo de aparelho usado numa gama de valores desde alguns milímetros, até cerca de 50 mm. O medidor utilizado deve ter um campo elétrico apropriado, não inferior a metade da espessura do material a ser testado [24];
- As leituras devem ser registadas com a totalidade do elétrodo em contacto firme com a superfície do material e, de seguida, aliviar a pressão para retirar o equipamento do contacto com o



material. Esta deve estar livre de defeitos, tais como: decadência, nós (madeira), furos, resinas, infeções bacteriológicas. Se possível, aconselha-se que se garanta um espaçamento entre o eletrodo e o limite final da peça de material a ser testado, pelo menos, igual à espessura da peça [30];

- Repetir o procedimento ao longo do comprimento do material e, deste modo, encontra áreas húmidas. Durante este processo, para evitar a danificação do material em ensaio (como por exemplo: papel de parede ou de madeira), deve-se evitar arrastar o medidor pela superfície.

### 3.5.5. ERROS

As leituras podem ser influenciadas por:

- Materiais demasiado finos, uma vez que, as leituras em profundidade podem ser influenciadas por outros materiais;
- Quando um elemento constituído por camadas de materiais distintos, a calibração é menos precisa e caso o campo elétrico seja irradiado pelas várias camadas, pode-se obter um erro associado à calibração estimada;
- A existência de folgas de ar entre a amostra e o medidor diminui a superfície de contacto. Para atenuar essa situação deve-se exercer uma ligeira pressão no equipamento;
- Medições perto dos limites do material;
- Variação das propriedades do tipo de material em (análise) em comparação com o teórico de calibração;
- Aproximações de correlações (normalmente lineares) quando não existem dados e correções para um material específico, pode levar a desvios de resultados.

## 3.6. MÉTODO DE MEDIÇÃO MICRO-ONDAS

### 3.6.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

O método baseado na utilização de micro-ondas (gama de frequências de 300MHz a 30GHz - Fig. 28) consiste na modificação das propriedades dielétricas (do material) aquando da penetração desta radiação eletromagnética nos materiais em teste e respetiva determinação do teor de água. A sua determinação está relacionada com a natureza polar das moléculas de água [31].

Deste modo, as propriedades dielétricas do material são representadas pela permissividade relativa ( $\epsilon$ ), esta que é uma propriedade elétrica intrínseca do material, que caracteriza a interação do material com o campo elétrico gerado. A permissividade relativa é uma entidade complexa que muitas vezes é escrita como  $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$ . A parte real ( $\epsilon'$ ) reflete a capacidade de um material armazenar energia do campo elétrica, e a parte imaginária ( $\epsilon''$ ) é geralmente associada como a capacidade de um material dissipar energia elétrica na forma de calor.  $j = \sqrt{-1}$  é a unidade imaginária correspondente à perda dielétrica que se caracteriza pela deslocação de fase do movimento das moléculas [32].

A presença de água contida nos materiais causa perturbações à passagem de micro-ondas, emitidas pelo aparelho. As moléculas de água apresentam uma maior absorção das ondas micro-ondas do que um material seco, e consequentemente possuem diferentes constantes dielétricas. Apesar das moléculas de água serem mais sensíveis do que os compostos que formam o material "seco", este último não

pode ser negligenciado, pois a estrutura do material pode interagir com o feixe de micro-ondas [11]. O transmissor de micro-ondas gera um campo eletromagnético alternado, com frequência micro-ondas, que é recebido pelo recetor. As moléculas de água sujeitas ao campo eletromagnético de micro-ondas, advindas do emissor, entram em movimento de rotação (polarização). À medida que se vai aumentando a frequência das ondas, as moléculas de água (polares), devido a forças de ligação internas, não acompanham o campo eletromagnético exterior. Devido à excitação das moléculas perante as elevadas frequências, gera-se uma deslocação de fase, isto é, aquecimento e deste modo, verifica-se consumo de uma certa parcela de energia. O diferencial existente entre a emissão e a receção (atenuação de micro-ondas) permite quantificar o teor de humidade do material. No fundo, mede-se a amplitude e a frequência da resposta do sinal recebido [32].

Esta medição pode ser realizada por transmissão, caso a fonte recetora esteja do lado contrário à emissora, ou por reflexão, caso estejam lado a lado. Deste modo a reflexão e a transmissão são considerados indicadores do teor de humidade [16]. A medida resultante é uma combinação da densidade do material e do seu teor de humidade medidos em profundidade. A densidade do material e temperatura do material são os principais fatores de influência dos teores de humidade. Não se verifica a influência de sais nas leituras com a utilização de frequências superiores a 10GHz [31].

Esta técnica não destrutiva assemelha-se aos métodos baseados na capacitância, uma vez que, mede as variações da constante dielétrica de um material de acordo com as variações do seu teor de humidade. No entanto, contrariamente ao método anterior (capacitância) que opera segundo um sinal de radiofrequência, o método de micro-ondas funciona através da propagação de radiação eletromagnética de elevadas frequências, como podemos constatar na Fig. 28.

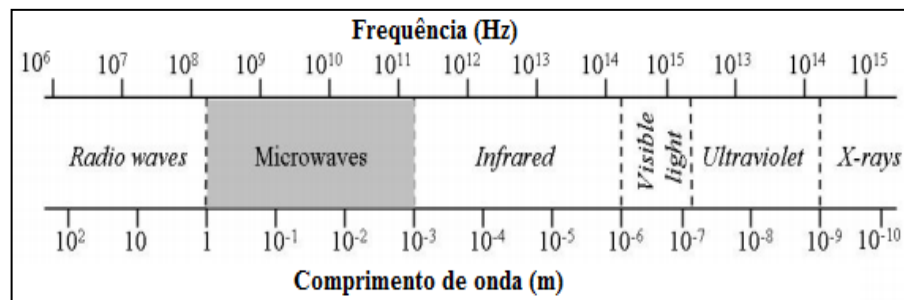


Fig. 28 - Espectro eletromagnético que traduz a frequência (Hz) e comprimento de onda (m) no vazio [31]

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) relaciona-se com a frequência ( $f$ ), através da velocidade de propagação ( $c$ ), pela seguinte fórmula [26]:

$$c = \lambda \cdot f \quad (11)$$

Embora a velocidade de propagação no espaço livre ( $c$ ) seja  $3 \cdot 10^8$  m/s, tanto a velocidade, como o comprimento de onda, sofrem uma redução substancial aquando da entrada da onda num meio dielétrico. A influência da mudança de fase e de atenuação da onda é mostrada na Fig. 29.

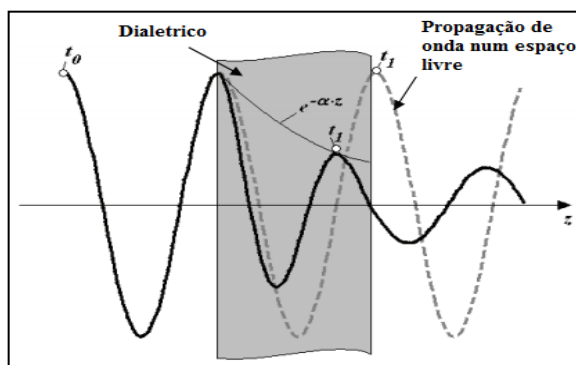


Fig. 29 - Gráfico comparativo da atenuação de onda emitida pelo transmissor no momento  $t_0$  e respetivo decréscimo (atenuação de picos) quando atravessa um meio dielétrico no momento  $t_1$  (linha preta) em relação a uma onda propagada no vazio. (linha tracejada) [32]

### 3.6.2. EQUIPAMENTOS

Os equipamentos micro-ondas podem ser portáteis ou fixos (linhas de produção). Normalmente os portáteis (Fig. 30) são constituídos por uma antena que possibilita medições não destrutivas a uma profundidade de 20 a 30 cm (dependendo das características do material) com recurso a micro-ondas. Normalmente, o valor medido é apresentado, em percentagem (%) de teor de humidade por volume, num mostrador. Este aparelho é constituído por duas sondas (emissoras e recetora) que são colocadas em contacto com a superfície do material em teste. O aparelho possui ainda um condensador, um microprocessador e um mostrador.

### 3.6.3. CALIBRAÇÃO

A calibração envolve o conhecimento de variáveis de referência obtidas a partir de uma outra medição, nomeadamente, através do método gravimétrico (especificado anteriormente). Certos equipamentos possuem uma base de dados com alguns materiais, contudo a lista é normalmente pouco extensa. Nestes casos basta selecionar a calibração de acordo com o material a ser testado. A calibração é, portanto, efetuada diretamente na unidade de avaliação. Noutras situações, os materiais a ensaiar não constam na base de dados. Alguns equipamentos contêm um software com uma especificação própria para introdução dos valores e multivariáveis obtidas previamente. Outros equipamentos têm um sistema de calibração própria, isto é, a amostra depois de seca em estufa (método gravimétrico) é sujeita a uma medição de acordo com o explicado no subcapítulo “Procedimento”. Deve-se repetir esta medição 5 vezes para garantir que o valor de referência permanece inalterado ou com uma variação negligenciável [35]. O valor resultante desta medição vai ser fixado como valor do material em estado “seco”, e portanto é o valor de referência.

Desta forma, pode-se imediatamente converter a atenuação do campo eletromagnético em teor humidade através de uma proporção direta e obter as variáveis necessárias para a respetiva calibração. A curva de calibração é calculada automaticamente [34]. Sugere-se um controlo regular do equipamento e periódicos procedimentos de calibração.

#### 3.6.4. PROCEDIMENTO

Para que as amostras sejam representativas da realidade aconselha-se a utilização de um procedimento o mais uniformizado e semelhante possível entre medições. Seguidamente apresenta-se uma forma de atuação:

- Antes de ligar o equipamento deve-se garantir que este está a apontar para um espaço livre, longe do corpo e da superfície do material. Reunidas estas condições pode-se ligar. Deste modo garante-se que a calibração automática não é comprometida para o tipo de material que desejamos. Caso seja necessário introduzir variáveis de materiais que não constam na base de dados deve-se fazer previamente ao início das medições (calibrar de acordo com o referido no subcapítulo “Calibração”);
- Colocar a sonda emissora e a recetora (equipamento) perpendicularmente em relação á superfície do material e garantir um perfeito contacto com a mesma. O campo gerado micro-ondas deve ter uma extensão de 20 a 30 cm desde a superfície do material (Fig. 30). Manter o equipamento ligeiramente pressionado durante o processo até surgirem as medições no mostrador. Os valores obtidos podem ser apresentados qualitativamente (se está seco, molhado ou em risco e) e quantitativamente (em percentagem do teor de humidade por volume de material);
- De modo a minimizar erros de medição causados pelas heterogeneidades e variações de espessura dos materiais é recomendado fazer medições em vários pontos de modo a cobrir toda a área examinada. Para isso pode fazer-se medições espaçadas de 10 a 15 cm na vertical e na (aproximadamente uma grelha de pontos). Todas as medições devem ser realizadas a pelo menos 15 cm dos limites do material devido ao raio de atuação do equipamento. (Fig. 31).
- Limpar o equipamento sem utilizar solventes á base de álcool ou abrasivos.
- Ao armazenar o aparelho garantir que esta protegido da luz solar.
- Não utilizar o equipamento numa atmosfera que contenha óleo, sulfatos e cloro.
- As micro-ondas não aquecem ou alteram o estado ou a forma do material, uma vez que as moléculas polares são sujeitas a energias emitidas extremamente baixas (tipicamente cerca de 0,1 mW) [35].



Fig. 30 - Profundidade de atuação de um equipamento baseado na técnica micro-ondas (esquerda) e capacitância (direita) (TROTEC)

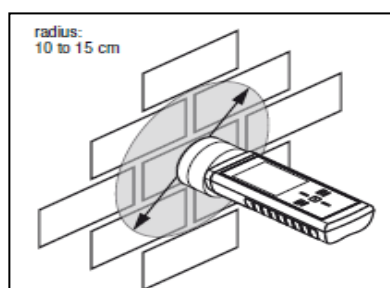


Fig. 31 - Raio de atuação de um equipamento baseado na técnica micro-ondas aplicado somente num material (tijolo se estar em contacto com a argamassa) (TROTEC)

### 3.6.5. ERROS

Alguns dos fatores e erros que podem influenciar as medições do teor de humidade:

- Por vezes não é possível garantir um contacto perfeito da fonte emissora e recetora com a superfície do material em teste devido á rugosidade e/ou tipologia (por exemplo tipologia curva) que apresenta. Deste modo o sinal vai ser afetado por uma distorção que depende da distância entre as sondas (recetoras e emisoras) e o material. De acordo com a análise da Fig. 32, verifica-se que á medida que se aumenta o espaçamento entra as sondas e a superfície do material em estudo, o sinal perde intensidade até  $\lambda/4$  (pico menos afetado) ( $\lambda$  é o comprimento de onda), sendo seguido por uma série de picos menores [11];
- A largura do material não é superior á profundidade de extinção dos feixes, uma vez que o campo de ondas micro-ondas deve ser completamente absorvido pelo material. Caso o percurso das ondas seja mais curto que a profundidade de extinção das mesmas, uma fração das micro-ondas que atingem o lado de trás do objeto é refletida sobre a superfície interna, o que vai reforçar o sinal de retroespalhamento, e consequentemente obtêm-se um maior teor de humidade;
- Medições efetuadas próximas dos limites do material;
- Quando se aplica o procedimento a elementos compostos por camadas de diferentes materiais, em que o feixe micro-ondas atravessa varias camadas distintas (com diferentes densidades) até se extinguir. Por vezes, o teor de humidade pode variar dentro do mesmo tipo de material devido a variações da sua textura interna. O feixe de micro-ondas é atenuado exponencialmente aquando da passagem de um meio de um determinado material. Desta forma, variando o tipo de material o coeficiente de extinção vai ser alterado, e quanto mais elevado for, maior será o teor de humidade;
- Matérias onde as moléculas de água não são capazes de oscilar, por exemplo, a água cristalizada e gelo não respondem à medição;
- Fatores tais como a cor, a viscosidade e pó, têm apenas um efeito negligenciável no desempenho da medição [34];
- A presença de espaços vazios no material pode fornecer leituras enganadoras. Exemplos comuns: gesso separado da parede de tijolos ou uma fenda profunda dentro de um pedaço de madeira. No caso de um feixe de micro-ondas de comprimento de onda ( $\lambda$ ), as ondas estacionárias ressonantes podem formar-se no interior da cavidade, e causar reflexões internas. Esta situação complexa torna a deteção e a interpretação de tais discontinuidades incerta;
- Um sensor de micro-ondas baseado na transmissão, no caso da madeira, irá medir uma média do ângulo das nervuras, o que reduz a precisão da medição de micro-ondas, uma vez que há

mais interações e a permissividade é 2 vezes maior quando o campo eletromagnético é orientado paralelamente às fibras [36];

- Quando se move o equipamento de uma zona fria para uma zona quente, existe a possibilidade de formação de condensação na parte superficial do aparelho.

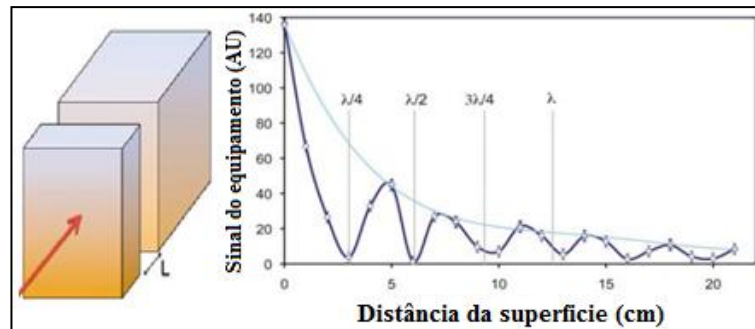


Fig. 32 - Atenuação de sinal (AU) emitido pelo aparelho à medida que a distância,  $L$  (cm), entre a sonda e objeto aumenta (linha azul escura). A Linha azul clara é uma regressão da atenuação dos picos [11]

### 3.7. MÉTODO TDR

#### 3.7.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

A técnica TDR é baseada na determinação do tempo de propagação de impulsos eletromagnéticos ao longo de um sensor embutido no material em teste. Esse impulso é propagado segundo uma linha de transmissão até ser refletido, e consequentemente analisado com um osciloscópio, de modo a estimar a constante dielétrica do meio. A constante dielétrica complexa ( $\epsilon''$ ) é uma propriedade elétrica que traduz a razão da permissividade dielétrica do meio em ensaio pela permissividade dielétrica do vácuo. Assim, a parcela complexa da permissividade ( $\epsilon''$ ) de um meio pode ser estimada pelo uso desta técnica [14]. Esta constante é bastante dependente do teor de água volumétrico para frequências num intervalo de valores dos MHz aos GHz.

Deste modo podemos referir que o parâmetro fundamental determinado pelo uso desta técnica (TDR) é a permissividade  $\epsilon$  (não dimensional), esta que depende do tempo de percurso das ondas decorrido desde a sua emissão até a sua reflexão [14]. O campo eletromagnético constituído por ondas de cerca de 1 GHz ao penetrar no interior do material, parte dessa energia vai ser dissipada, no entanto, a restante energia, não é dissipada, sendo assim refletida pela sonda final e regressa ao recetor. Este tempo decorrido desde a emissão até à receção é o tempo de percurso.

A permissividade dielétrica dos materiais é repartida pela parte real ( $\epsilon'$ ) e imaginária ( $\epsilon''$ ) onde:

- $\epsilon'$  - Representa a quantidade de energia libertada pelo campo elétrico alternado, sendo o valor de base para a estimativa da humidade usando TDR;
- $\epsilon''$  - Representa as perdas de energia por condutividade iônica, o que na prática depende da salinidade média, contudo, só existe influência de sais nas medições em baixas frequências e a frequência de operação TDR é de cerca de 1 GHz [37]. A parte complexa não é, igualmente, afetada pela densidade aparente e tipo de material poroso.

Com os pressupostos acima referidos sobre o método TDR é possível calcular a permissividade relativa do material pela seguinte fórmula [38]:

$$\varepsilon = \left( \frac{ct_p}{2L} \right)^2 \quad (12)$$

Onde:

- $\varepsilon$  – Constante dielétrica do meio;
- $c$  - Velocidade da luz no vácuo ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ( $3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ );
- $t_p$  - Tempo de percurso ao longo do sensor de TDR (PS);
- $L$  - Comprimento de elementos de medição dos sensores de TDR (m).

A permissividade, como referido na técnica “micro-ondas” diz respeito ao comportamento das moléculas sujeitas a um campo eletromagnético alternativo e dissipação de energia do material após a libertação do respetivo campo eletromagnético [39-40]. A densidade aparente de meios porosos varia de acordo com a sua estrutura, com as ações de determinadas fases, mas principalmente com a presença de água. Isto é causado pelo carácter dipolar das moléculas de água. Ao contrário de outras fases de meios porosos, a distribuição de cargas elétricas das moléculas de água é assimétrica e o valor de permissividade dielétrica relativa atinge os 80. Em comparação com outros materiais, o valor da permissividade da água é várias vezes superior. Por exemplo, a permissividade do ar é igual a 13, do granito 4-9, do arenito 2-3, da argila 2-6 e 4-5 para a areia. Para utilização desta técnica TDR, a diferença entre os valores de permissividade do ar, das fases sólidas e da água é essencial para a determinação de humidade [41-42].

Assim sendo, é possível calcular os respetivos tempos de reflexão do material através da fórmula que se segue [43]:

$$t = \left( \frac{2L}{c} \right) \cdot \sqrt{\varepsilon_{ar}} \quad (13)$$

A título de exemplo, segue-se uma simulação dos tempos percorridos no vazio e na água, com a utilização de uma sonda de medição TDR de comprimento de 15 cm ( $L$ ) onde [42]:

- $t_{ar}$  o tempo de percurso no ar;
- $t_w$  o tempo de percurso da água;
- $\varepsilon_{ar}$  constante dielétrica de 1 para o ar;
- $\varepsilon_w$  constante dielétrica de aproximadamente 81 para a água.

$$t_{ar} = \left( \frac{0.3}{3 \cdot 10^8} \right) \cdot \sqrt{1} = 1 \text{ ns} \quad (14)$$

$$t_w = \left( \frac{0.3}{3 \cdot 10^8} \right) \cdot \sqrt{81} = 9 \text{ ns} \quad (15)$$

Constata-se a existência de um período de atraso de apenas 8 ns entre os dois ensaios realizados, isto é, num dos casos existe aproximadamente 0% e no outro cerca de 100% de humidade. [42]

Esse atraso pode ser facilmente observado na Fig. 33, em que o gráfico da parte superior diz respeito a materiais secos (ou ar), com baixo valor de permissividade relativa, ao invés do gráfico da parte inferior, que corresponde a materiais húmidos.

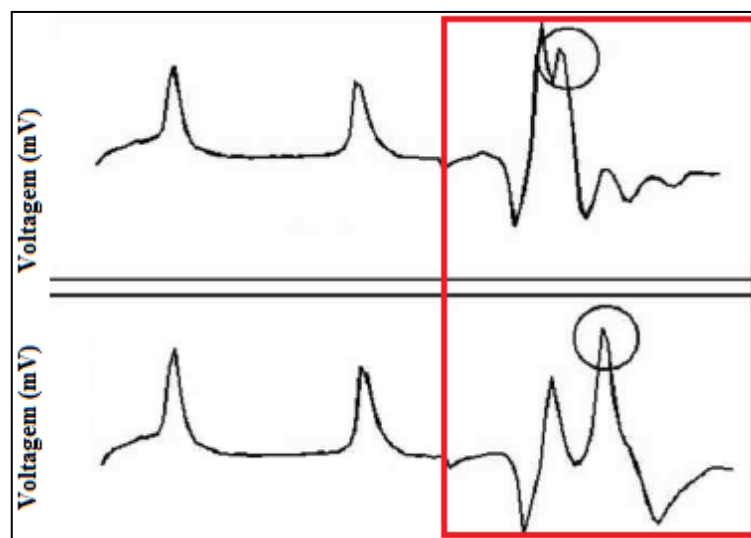


Fig. 33 - Exemplo de aplicação do método TDR que relaciona a voltagem do sinal (mV) em função do tempo percorrido (ps) para o material seco (em cima) e húmido (em baixo) [43]

A diferença principal dos gráficos é visível nos picos evidenciados por círculos. A Posição destes picos depende da permissividade do material. No caso dos materiais secos, o pico está mais perto da parte inicial do gráfico (esquerda). No caso de materiais húmidos o pico está mais deslocado para a direita, o que significa que o tempo de propagação do sinal ao longo do material húmido é mais longo, pelo que se comprova pelas expressões (10) e (11).

Pela medição do tempo de percurso, e calculada a permissividade dielétrica, é possível obter o teor de humidade utilizando modelos teóricos e físicos ou fórmulas empíricas de calibração obtidos pelos exames experimentais. [44-45] Desta forma é possível estimar a humidade com razoável certeza e sem depender muito de outros fatores que influenciam as leituras, como a temperatura ou salinidade [49-50].

### 3.7.2. EQUIPAMENTOS

O equipamento TDR é constituído pelos seguintes elementos [46]:

- Gerador de impulsos de alta frequência;



- Um osciloscópio;
- Duas ou três sondas, com filamentos em forma de hastes ou placas. Estas devem ser de reduzido diâmetro, afuniladas e de menores dimensões para materiais mais duros de modo a diminuir as oscilações e a existência de intervalos de ar entre o material e a sonda. Normalmente, as sondas são paralelas, separadas cerca de 5 cm, e constituídas por substâncias metálicas com comprimentos entre os 10 e 50 cm;
- Cabo coaxial para ligação entre o equipamento (unidade de processamento) e as sondas não deve ser mais extenso que 30 m.

Atualmente já existem equipamentos TDR portáteis que possuem sistemas digitais de calibração incorporados. É necessário que o dispositivo de medição seja capaz de funcionar em períodos curtos com uma precisão de  $\pm 2$  pico segundos.

### 3.7.3. CALIBRAÇÃO

Com permissividade dielétrica medida, o teor de humidade pode ser calculada usando modelos teóricos e físicos ou através de fórmulas de calibração empíricas obtidas por ensaios experimentais, nomeadamente através do método gravimétrico.

A função de calibração seguinte do teor de água ( $u$ ) expressa o teor de humidade em massa por unidade de volume de uma amostra em função da sua permissividade dielétrica ( $\varepsilon$ ) para a maioria dos solos minerais [47]:

$$u = -5.3 * 10^{-7} + 0.029\varepsilon - 5.5 * 10^{-4} \cdot \varepsilon^2 + 4.3 * 10^{-6} \cdot \varepsilon^3 \quad (16)$$

Em que:

- $u$  - Teor de humidade em massa por unidade de volume ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\varepsilon$  - Permissividade do meio envolvente.

Há muitas outras fórmulas de calibrações do teor humidade com base em dados empíricos que incluem a textura do solo, a densidade do solo, a temperatura ou modelos que especifica o material consoante as suas fases, ou seja, sólida, gasosa, ou líquida (água livre e água de ligação) [48]. A técnica TDR permite a determinação do solo com uma precisão de  $\pm 2\%$  do valor medido em relação ao método gravimétrico (método padrão de medição) como podemos contatar pela análise da Fig. 34 [49]. Pode-se ainda realçar, que embora ambos os métodos apresentem resultados semelhantes, nos dois casos expostos o método TDR apresenta valores de teor de água (volumétricos) ligeiramente inferiores aos medidos gravimetricamente.

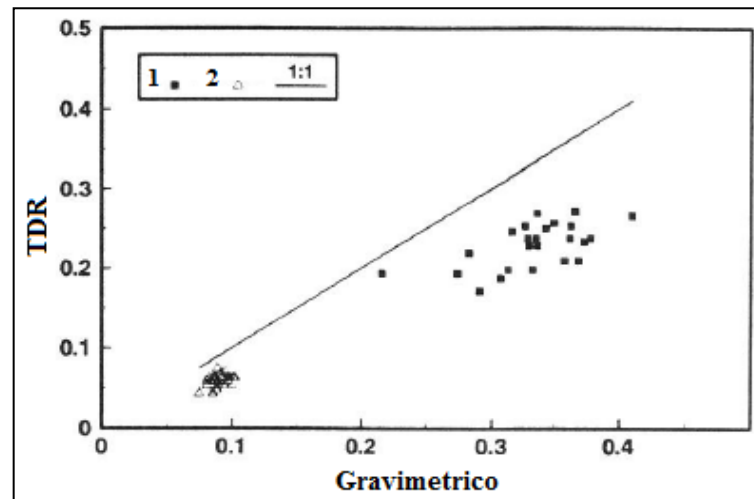


Fig. 34 - O gráfico traduz uma comparação da medição do teor de humidade, em percentagem (volumétrico), através do método gravimétrico e TDR, de duas amostras de solo idênticos, mas sujeitos a condições de precipitação diferente. A linha contínua traduz uma relação perfeita de 1:1. A situação 1 corresponde ao provete com condições de precipitação menores. A situação 2 corresponde à amostra de solo sujeita a precipitação mais intensa [49]

#### 3.7.4. PROCEDIMENTO

Em seguida, é apresentada uma sequência de procedimentos a adotar para a realização do ensaio [49]:

- Primeiramente procede-se à furação do material em ensaio até profundidade desejada. O diâmetro de furação deve estar em conformidade com a espessura dos filamentos da sonda. (utilizar técnica de furação de acordo com o referido no subcapítulo gravimétrico);
- As sondas, normalmente constituídas por dois ou três filamentos paralelos, em forma de hastes ou placas (que atuam como uma trajetória de transmissão) são implantados no material. Podem ser inseridas manualmente, contudo em solos mais duros essa inserção pode criar oscilações e provocar intervalos de ar entre a sonda e o material. Nestes casos, as hastes devem ser introduzidas num ângulo de cerca de 48°. Pode existir a necessidade de inserção mecânica;
- É aplicada uma determinada voltagem (cerca de 1 GHz de frequência), que se espalha ao longo de um cabo coaxial ligado às sondas. Estas são normalmente paralelas, e por isso cria-se um campo eletromagnético no material existente entre as mesmas;
- A parte contínua, isto é, a energia que não foi dissipada no trajeto e atinge o sensor final, é completamente refletida pelo mesmo. O tempo decorrido entre a emissão do sinal e a receção da respetiva reflexão é medido pelo aparelho;
- O tempo decorrido entre a emissão e a reflexão é relacionado com permissividade dielétrica medida e através da calibração do aparelho obtém-se o teor de humidade;
- A permissividade dielétrica do meio é determinada pela interpretação do sinal refletido no osciloscópio). O sinal refletido no osciloscópio pode ser interpretado através das curvas de calibração, sendo o valor do teor de humidade apresentado no mostrador em percentagem de volume de água, nos equipamentos mais recentes.

### 3.7.5. ERROS

Este método como é pouco influenciado por variações das propriedades dos materiais tais como: textura, massa volúmica aparente, temperatura, sais presentes no material e condutividade elétrica, sendo que proporciona resultados com uma percentagem de precisão interessante. No entanto podem surgir alguns erros tais como:

- Intervalos de ar que surgem da dificuldade existente quando as sondas TDR são inseridas em materiais mais duros.

## 3.8. MÉTODO DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

### 3.8.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

O método de atenuação de raios gama consiste na determinação da diminuição de intensidade de radiação gama, emitida por uma fonte radioativa, aquando da passagem dos feixes colimadores por um material de determinada espessura. A atenuação pode ser relacionada com a densidade da amostra e, consequentemente, com o teor de humidade [50].

A deteção de raios gama é um processo de múltiplas etapas:

- Um raio gama entra num detetor (cristal cintilador) onde se produz um eletrão rápido (que se move rapidamente), por um dos três processos seguintes (Fig. 35):
  - O efeito fotoelétrico,
  - O efeito Compton;
  - Produção de pares.

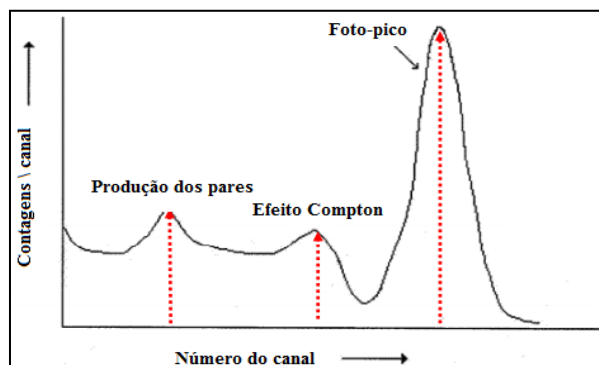


Fig. 35 - Distribuição espectral da medição do processo de interação dos raios gama no cristal dos diferentes processos (fotolétrico, compton, produção de pares) e respetivo aumento de cintilações [50]

Este eletrão rápido perde a sua energia pela excitação dos iões no seu percurso à medida que atravessa o cristal. Esta energia de excitação é emitida em várias formas, nomeadamente pela emissão de luz visível (fluorescência). Assim, um único raio gama de alta energia entra no cintilador e produz um flash de fótons de baixa energia [51]. Estes fótons são conduzidos para a superfície fotossensível de um fotomultiplicador onde são libertos eletrões pelo efeito fotomultiplicador. Os eletrões são recolhidos no fotomultiplicador e amplificados para produzir um impulso de corrente, a qual é convertida para um impulso de tensão, cuja altura é proporcional ao número de fotelétrões que atingem o tubo. A energia inicial do eletrão rápido é proporcional ao número de fótons no tubo [50]. O pico fotelétrico observado no espectro (Fig. 35) traduz uma energia igual ao do raio gama de entrada.

Quando uma fonte radioativa é colocada próximo do cintilador, o fotomultiplicador produz uma série de impulsos, cada um correspondendo a um decaimento do único núcleo. A amplitude de cada impulso está relacionada com a energia dos eletrões libertados pelo raio gama. Um contador analisa o número de contagens dos impulsos de voltagem de intensidade num intervalo de valor ajustável, outro cria um espectro de diminuição da radiação gama [50].

Os materiais mais leves absorvem menos fotões em comparação com materiais mais densos. Desta forma, quanto maior o teor de humidade contida no material, menor é a atenuação de fotões gama monocromáticos aquando da penetração.

A intensidade de transmissão (fotões efetivamente recebidos) de um feixe monocromático de raios gama na passagem por um material seco é função da energia incidente e das propriedades do material, como se pode verificar [52]:

$$\ln \left( \frac{I}{I_0} \right) = -\mathcal{G}\rho d \quad (17)$$

Onde:

- $I_0$  - Intensidade da radiação incidente, (contagens/s);
- $I$  - Intensidade transmitida pelo feixe, (contagens/s);
- $\mathcal{G}$  - Coeficiente de absorção ou atenuação do material ( $\text{m}^2/\text{kg}$ );
- $\rho$  - Densidade da amostra ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $d$  - Espessura da amostra. (m).

Da mesma forma, a atenuação de um feixe que atravessa um material molhado é descrita por [52]:

$$\ln \left( \frac{I}{I_0} \right) = -d(\mathcal{G}_s \cdot \rho_s + \mathcal{G}_w \cdot \rho_w) \quad (18)$$

Onde:

- $\mathcal{G}_s$  - Coeficiente de absorção da amostra seca ( $\text{m}^2/\text{kg}$ );
- $\rho_s$  - Densidade da amostra seca ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $\mathcal{G}_w$  - Coeficiente de absorção da água ( $\text{m}^2/\text{kg}$ );
- $\rho_w$  - Densidade da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

O teor de humidade volúmico  $\theta$  ( $\text{m}^3 / \text{m}^3$ ) e ponderal, pode ser expressa respetivamente como:

$$\theta = \left( \frac{\ln \left( \frac{I_s}{I_w} \right)}{\mu_w \rho_w d} \right) \quad (19)$$

$$\mu = \left( \frac{\theta}{\rho} \right), [kg/kg] \quad (20)$$

Onde:

- $I_s$  - Intensidade da amostra seca (contagens/s);
- $I_w$  - Intensidade da amostra molhada (contagens/s);
- $\rho$  - Massa volúmica do material poroso em estudo ( $kg/m^3$ ).

O coeficiente de absorção e a densidade (massa volúmica) são determinados em cada material sendo o valor do coeficiente de absorção da água ( $\mathcal{Q}_w$ ) de aproximadamente de  $0.0191$  ( $m^2/kg$ ). Este valor foi obtido experimentalmente e corresponde a uma fonte de amerícium 241 [52-53].

Devido á natureza altamente penetrante da radiação dos raios gama, é possível o uso do método em materiais com estrutura fina ou densa e com qualquer propriedade física e elétrica. O método é realizado sem necessidade de contato direto com a amostra (não destrutiva e não invasiva) e sem preparações da superfície, portanto, é altamente recomendada em ambientes agressivos (temperatura, pressão, corrosivo, explosivo).

### 3.8.2. EQUIPAMENTOS

O equipamento experimental de medição do teor de humidade para aplicação do método em questão, é o seguinte [53]:

- Fonte radioativa inserida numa proteção com colimador (de modo a evitar a dispersão das partículas emitidas) (Fig. 36). Normalmente usa-se a fonte radioativa amerícium 241;
- Detetor de cintilação inserido (cristal de cintilação de iodeto de sódio ativado com tálio ou em alternativa brometo ou cloreto de lantânio ativado com cério) numa proteção de modo a reduzir o fundo de radiação gama (blindagem). Este detetor é acoplado a um tubo fotomultiplicador com emissor integrado um circuito pré-amplificador. O tubo fotomultiplicador é alimentado por um fornecimento de alta tensão ajustável (Fig. 37);
- Unidade eletrónica de medida (Fig. 38);
- Estrutura de suporte (Fig. 39);
- Sistema de automatização do deslocamento e tratamento do sinal.

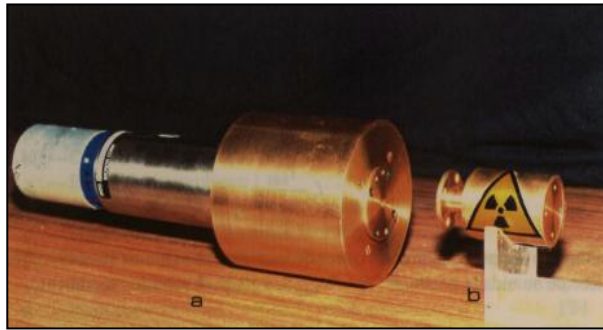


Fig. 36 - a) Detetor e proteção com colimador e b) proteção e colimador da fonte radioativa [53]



Fig. 37 - Aplicação do detetor e proteção com colimador à fonte radioativa no suporte metálico (imagem da direita) [53]

A fonte radioativa do equipamento, normalmente, é o Americium<sup>241</sup> devido ao elevado contraste e período de vida (cerca de 458 anos), contudo existem outras fontes radioativas, tais como o cézio<sup>137</sup> [58].

A unidade eletrónica de medida é formada pelos seguintes constituintes (Fig. 38) [53]:

- Alimentação (alta tensão) AT;
- Alimentação (baixa tensão) BT;
- Discriminador eletrónico;
- Voltímetro de elevado poder de voltagem;
- Temporizador;
- Medidor da taxa de contagem (espectrómetro de cintilação diferencial);
- Contador;
- Mostrador.

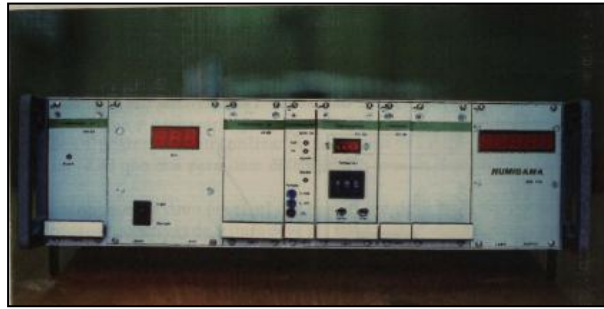


Fig. 38 - Unidade eletrônica [53]

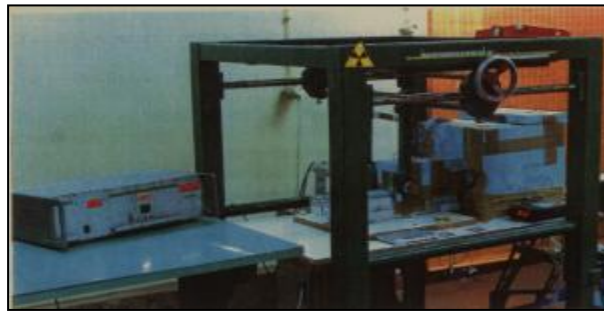


Fig. 39 - Conjunto do sistema de medida. Unidade eletrônica e estrutura de suporte ajustável [53]

### 3.8.3. CALIBRAÇÃO

A calibração do equipamento baseia-se na comparação, no mesmo instante temporal, da variação da massa dos provetes alcançada pelo método gravimétrico (pesagem-secagem-nova pesagem) e respetiva variação da massa calculada com recurso a integração de perfis de teor de humidade obtidos por via de atenuação de raios gama [53].

Pode constatar-se que o método de atenuação de raios gama possui uma boa precisão devido à ótima conformidade demonstrada pelos perfis hídricos do ensaio experimental de dois provetes de betão celular submetidos a embebição e secagem natural (Fig. 40), tanto no aumento, como na diminuição da massa de água contida na amostra.

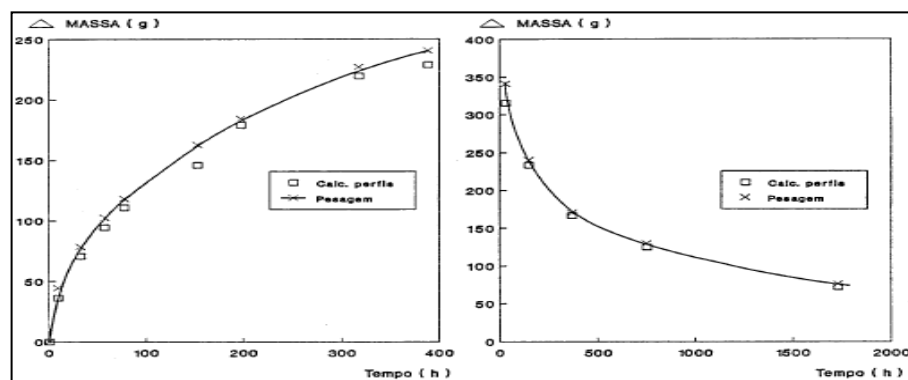


Fig. 40 - Análise comparativa da massa obtida por secagem e por integração dos perfis hídricos – embebição do betão celular (primeiro gráfico). Análise comparativa da massa obtida por secagem e por integração dos perfis hídricos – secagem do betão celular (segundo gráfico) [52]

#### 3.8.4. PROCEDIMENTO

Primeiramente deve-se garantir que os provetes têm um comprimento no máximo de cerca de 0.5m.

A unidade eletrónica deve ser ligada aproximadamente 10 minutos antes de iniciar o ensaio. Desta forma garante-se a estabilização do sistema [53].

Existem dois modos diferentes de operação das técnicas que utilizam fotões gama: o modo de transmissão, onde a fonte radioativa e o detetor estão colocados em lados opostos da amostra e o modo de espalhamento, em que tanto a fonte radioativa, como detetor, são colocadas no mesmo lado da amostra. A técnica do modo de espalhamento é menos popular devido às complicações na quantificação decorrentes dos efeitos de atenuação e espalhamento múltiplo e devido à exigência de elevado tempo de exposição.

A fonte é posicionada a uma distância conveniente da amostra, pelo que não existe contacto direto do equipamento com o material. Em laboratório a amostra é colocada numa placa regulável sendo a amostra posicionada de acordo com o modo de atuação referido anteriormente (transmissão ou espalhamento). A intensidade da radiação deve ser adaptada ao provete em ensaio, uma vez que doses elevadas de raios gama podem causar uma degradação substancial de certos materiais [22].

Após a colocação do provete liga-se o temporizador através do botão de arranque e as medições iniciam-se. A distância mínima entre pontos sucessivos de leitura deve ser em conformidade com as características do colimador, usualmente nunca inferiores a 5mm [53].

Os raios gama atravessam a amostra durante um período variável de acordo com a densidade dos materiais. A título de exemplo, para o equipamento HUMIGAMA.VF., o período de medição é cerca de 10 segundos e 100 segundos, para uma densidade de 500kg/m<sup>3</sup> e 2000 kg/m<sup>3</sup> respetivamente;

A leitura dos impulsos contados é realizada por observação do mostrador. Em equipamentos mais evoluídos, a salvaguarda automática de dados (em memória) é alternativa mais prática.

#### 3.8.5. ERROS

Alguns dos erros que podem surgir na aplicação deste método de determinação do teor de humidade são seguidamente enumerados [53]:

- Grande dificuldade de obtenção de valores de teor de humidade de saturação para alguns materiais de construção, como por exemplo o betão.
- Dificuldade na obtenção do coeficiente de atenuação da água devido à não equivalência entre o valor determinado experimentalmente e teoricamente;
- Determinação de um perfil de humidade;
- Dificil determinação da exata espessura do material da amostra (d), este que é função da intensidade da radiação (incidente e de transmissão) e consequentemente do teor de humidade;
- Devido à débil monocromaticidade da radiação gama, a unidade eletrónica é um fator de alguns erros;
- No caso de um reduzido número de contagem a precisão do equipamento pode ser comprometida, uma vez que a emissão de fotões na fonte radioativa é estatisticamente aleatório;
- A não utilização de um colimador aumenta a dispersão de partículas emitidas.



### 3.9. MÉTODO DE RESSONÂNCIA NUCLEAR

#### 3.9.1. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

O método de ressonância magnética nuclear baseia-se no momento angular (rotação) dos prótons carregados positivamente e no momento magnético resultante. Num campo magnético externo constante, os núcleos de hidrogénio agem como dipolos magnéticos. Embora o fenómeno de NMR possa ser observado com a utilização da maior parte dos núcleos atômicos estáveis, a maioria das aplicações de NMR baseiam-se no uso do núcleo de hidrogénio (H) devido à elevada abundância natural, versatilidade para materiais sólidos e o grande momento magnético nuclear deste isótopo. Existem dois níveis de energia de prótons, nomeadamente correspondentes à orientação do seu momento magnético, paralelo ou oposto à direção do campo magnético aplicado. Um campo magnético alternado de uma frequência especificada perpendicular ao campo constante induz as transições entre os dois níveis de energia. A quantidade de energia de alta frequência absorvida pela amostra é dependente do número de prótons da amostra e pode ser relacionada como teor de humidade da maioria dos materiais, desde que os núcleos de hidrogénio ocorram apenas sob a forma de água [54]. A generalidade dos materiais de construção, somente possui na sua constituição núcleos de hidrogénio sob a forma de água. Num material húmido, a densidade de hidrogénio é diretamente proporcional ao teor total de água no interior do volume do objeto detetado.

A amplitude (A) do sinal de NMR é uma medida da densidade de hidrogénio e consequentemente do teor de água. Assim sendo, a dependência funcional entre o sinal de NMR e o teor de humidade é linear. Muitas vezes, a mesma curva de calibração pode ser usados para diferentes materiais.

Portanto, em contraste com a maioria dos outros métodos (incluindo os raios gama e raios-x) a NMR pode ser considerado como um método direto de medição de humidade em materiais devido á sua elevada precisão de medição (frequência altas).

#### 3.9.2. EQUIPAMENTO

Os equipamentos baseados no princípio do método de ressonância magnética podem ser de análise em laboratório ou em *situ*. Normalmente os equipamentos de laboratório, contrariamente aos *in situ*, operam segundo uma abordagem de avaliação de ambos os lados da amostra.

O coração da configuração do equipamento é uma unidade de NMR constituída por uma unidade de controlo eletrónico (Fig. 41) e um íman (cuja função básica é gerar um campo magnético alto e homogêneo na região em que a parte anatómica será posicionada) com uma bobina de medição (Fig. 42). No campo de medição do íman, se a intensidade magnética for, por exemplo, 0.47 Tesla, a frequência de ressonância para núcleos de hidrogénio é cerca de 20 MHz [54].

A cabeça do sensor de medição está localizada entre os polos do íman. Desta forma só se tem acesso a apenas um lado da amostra. Devido á boa resolução espacial é necessária para a determinação das distribuições do teor de água uma cabeça do sensor de medição especial, isto é, o comprimento da sua bobina deve de ser de aproximadamente 3 mm ao invés dos 25 mm padrão para este tipo de unidade. Além disso o uso de uma cabeça de medição totalmente aberta permite a digitalização gradual da amostra. Esta cabeça de medição permite a utilização de amostras prismáticas até dimensões de seção de 50 x50 mm [55].

O íman está montado sobre uma estrutura deslizante, de tal maneira que a abertura com a cabeça de medição encontra-se horizontalmente na direção de deslocação da estrutura deslizante. A estrutura

desloca-se com o auxílio de um motor, de modo permitir que a bobina de medição gradualmente se desloque para gravar os perfis de humidade da amostra [54].

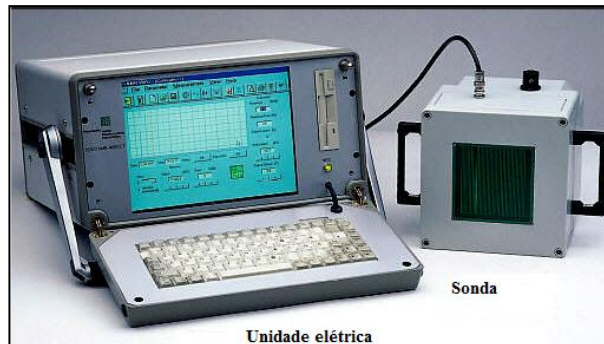


Fig. 41 - Sistema de medição portátil do teor de humidade através da técnica NMR de acesso unilateral [55]

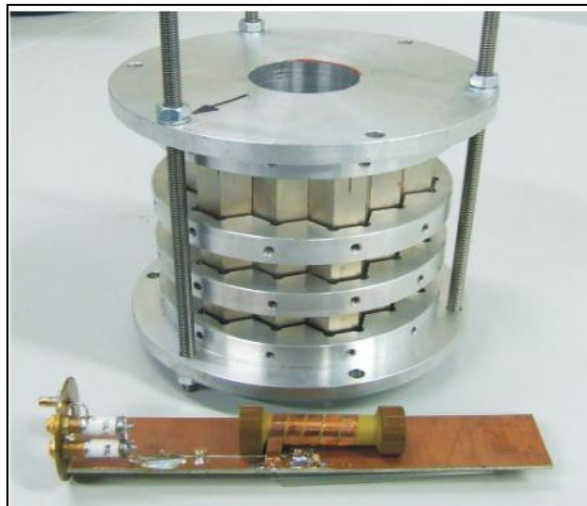


Fig. 42 – Conjunto do íman e respetiva bobina [56]

### 3.9.3. CALIBRAÇÃO

O diagrama da Fig. 43 exhibe uma curva de calibração típica, que representa a dependência funcional entre a amplitude (A) do sinal de NMR (utilização de Hidrogénio) e o teor de água do betão leve, expressa em percentagem de massa. A correlação é quase proporcional. Esta curva de calibração pode ser aplicada para quase todos os materiais de construção minerais (excepto os materiais com elevado teor de partícula ferromagnética). Dependendo do tempo de medição, a inexactidão do teor de água determinado é tipicamente entre 0,3 e 1% em massa. Valores de humidade tão baixas como 0,5% podem ainda ser detetadas. Mesmo que o material contenha outras substâncias hidrogenadas para além da água, ainda é possível determinar com precisão o teor de humidade.

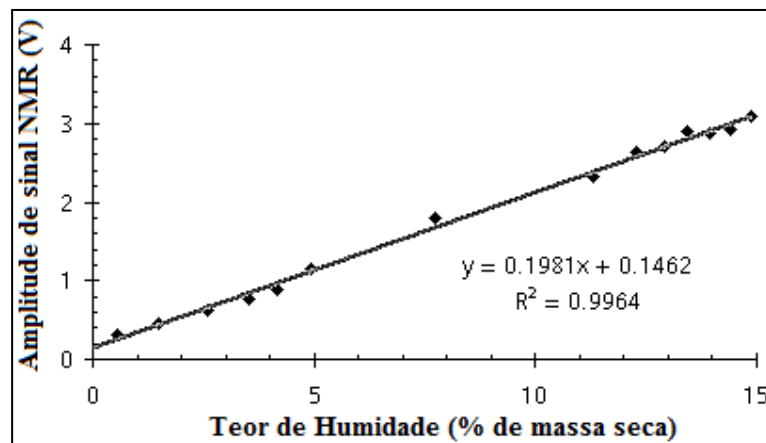


Fig. 43 - Medição do teor de água pela aplicação do método NMR a uma amostra de betão leve e respetiva calibração através do método destrutivo (gravimétrico) [57]

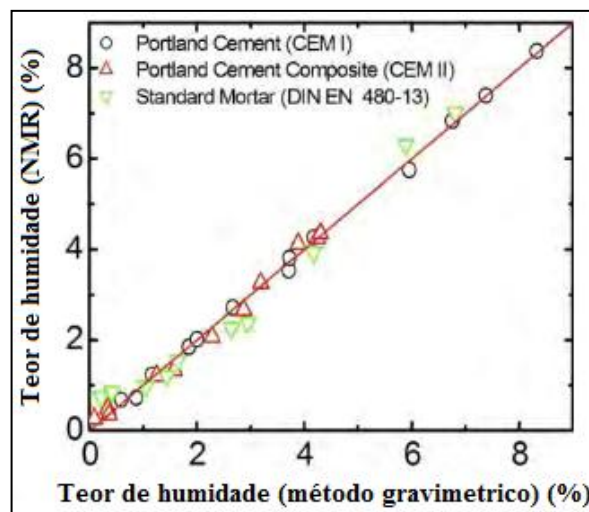


Fig. 44 - Correlação entre o teor de humidade medido com o método NMR e o teor de humidade medido por gravimetria de 2 tipos de cimento Portland (CEM1 e CEM2) e uma argamassa tradicional [57]

Os gráficos presentes nas figuras Fig. 43 e Fig. 44, evidenciam a elevada correlação linear que se verifica quando são realizadas leituras pelo método NMR e gravimétrico, para a mesma amostra de material. Estatisticamente, o valor do parâmetro  $r^2$  ( $r^2=0.9964$ ) traduz a forte semelhança de resultados obtido, uma vez que tende para um.

#### 3.9.4. PROCEDIMENTO

No caso de um aparelho cujo funcionamento necessita somente de acesso unilateral da amostra, nomeadamente, algumas abordagens *in situ*, o procedimento a adotar é o seguinte:

O equipamento é colocado paralelamente e em contacto com superfície do material a avaliar, ajustando-se o suporte elevador até à altura pretendida (Fig. 46). A profundidade analisada depende da frequência do pulso gerado. Aproximando gradualmente a sonda sensível ao objeto de teste, a profundidade de medição pode ser ajustada. Neste sentido, a medição em profundidade permite criar perfis de humidade do material, todavia estes sinais têm um alcance de deteção estável restrita aos 30 cm (máximo alcance do campo magnético) (Fig. 45).

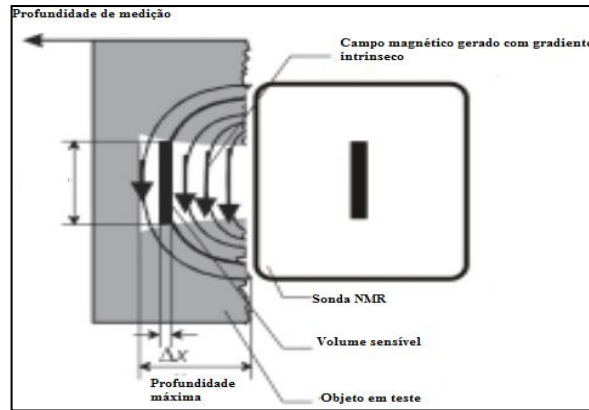


Fig. 45 – Funcionamento esquemático do equipamento NMR portátil de acesso unilateral [57]

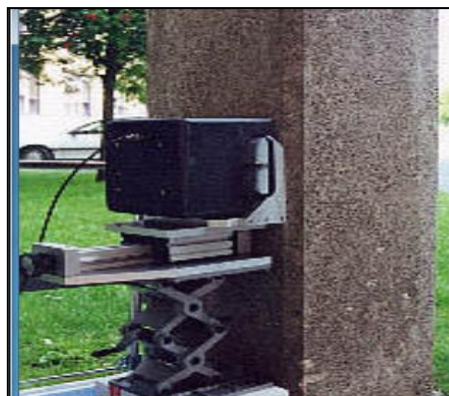


Fig. 46 – Equipamento NMR portátil de acesso unilateral, munido de uma plataforma elevatória [55]

### 3.9.5. ERROS

Os equipamentos portáteis podem ser utilizados para estudar amostras *in situ*, no entanto, a falta de homogeneidade do campo magnético gerado pelas sondas impede a sua utilização num espetro NMR de alta resolução. A fonte desta falta de homogeneidade deve-se à natureza do material magnético, este que pode ter polarização remanescente [55].

As leituras podem ainda ser influenciadas devido às pequenas variações de tamanho e posição da amostra o que conduz a distorções do campo [55].

Os resultados obtidos pela utilização deste método usualmente fornecem valores sobrestimados, uma vez que a água medida engloba, tanto a água livre, como a água de ligação.

### 3.10. RESUMO ESQUEMÁTICO DOS MÉTODOS

Com base nos métodos de medição do teor de humidade abordados é de especial interesse criar-se um documento que sintetize a informação mais relevante de cada método e desta forma contrapor as vantagens e desvantagens de cada um. Assim sendo, foi elaborado um quadro (Quadro 7) para que de forma rápida e intuitiva se consiga detetar qual o método de medição mais vantajoso para cada situação específica, nomeadamente: consoante o tipo de material, precisão, aplicabilidade no terreno ou em laboratório, custo de ensaio, facilidade e rapidez pretendida (entre outros fatores apresentado no Quadro 7).

De forma a facilitar a interpretação da informação apresenta-se de seguida os vários critérios tidos em consideração:

- Critério 1 – considera-se que o método é destrutivo quando existe deterioração da amostra em ensaio, e não destrutivo nas situações em que esta é preservada;
- Critério 2 - traduz o alcance atingido, em profundidade, pelas medições;
- Critério 3 - elucida uma estimativa temporal da realização dos métodos abordados;
- Critério 4 – são tecidas considerações sobre a aplicabilidade do método consoante o material da amostra em ensaio;
- Critério 5 – criou-se uma escala subdividida em quatro níveis de graduação (baixo, intermédio, elevado e muito elevado) que visam a quantificação qualitativa do custo dos equipamentos dos diferentes métodos estudados na presente dissertação;
- Critério 6 – traduz a portabilidade dos equipamentos e a possibilidade de aplicação dos métodos no *in situ*;
- Critério 7 – com base numa escala qualitativa subdividida em 4 níveis (reduzida, satisfatória, boa, elevada) estimou-se a precisão dos diferentes métodos;
- Critério 8 – determina a possibilidade ou impossibilidade de se obter um perfil de humidade, isto é, se o método possibilita a obtenção de uma descrição da evolução espacial (e temporal) da humidade ou se somente traduz valores globais da humidade das amostras;
- Critério 9 – Explícita a oportunidade de reutilização de uma mostra após a realização de um ensaio;
- Critério 10 – Segundo uma abordagem qualitativa (fácil, intermédia, difícil), estimou-se uma avaliação da facilidade de execução dos métodos, através de uma escala;
- Critério 11- Traduz a dificuldade de interpretação dos métodos estudados com base numa avaliação qualitativa (fácil, média, difícil);
- Critério 12 – considera-se a existência ou não de documentos normativos que possam servir de referência para a realização dos métodos;
- Critério 13, 14, 15 e 16 – considera-se a possibilidade de afetação dos resultados devido a descontinuidades de material, presença de sais/metais e humidade superficial, respetivamente;
- Critério 17 – traduz a necessidade de utilização de medidas de segurança para a realização dos ensaios, nomeadamente de proteção do operador;

- Critério 18 - considera-se a possibilidade de medição de água de ligação dos diferentes métodos.

Quadro 7 – Vantagens e desvantagens dos métodos de medição do teor de humidade

Métodos Parâmetros	Gravimétrico	Carbonato De Cálcio	Resistência Elétrica	Capacitância	Micro- ondas	TDR	Raios Gama	NMR
1 - Natureza do método	Destrutivo	Destrutivo	Não destrutivo (Pouco invasivo)	Não destrutivo	Não destrutivo	Não destrutivo (Pouco invasivo)	Não destrutivo ( <i>in situ</i> ) /Provete (em laboratório)	Não destrutivo ( <i>in situ</i> ) /provete (em laboratório)
2 - Profundidade de alcance de medições	Profundidade variável/ Igual à espessura da amostra	Profundidade variável / Igual à espessura da amostra	Praticamente superficial	Pouco abaixo da superfície	20 a 30 cm	10 a 50 cm	Igual à espessura da amostra	20-30 cm
3 - Tempo de medição (ensaio)	Moroso (> 3h)	10 Minutos	Imediato	Imediato	Imediato	Imediato	Imediato	Imediato
4 - Aplicável/ aconselhado a que material?	Qualquer	Materiais porosos (betão, argamassa, gesso)	Materiais porosos/ aconselhável a Madeiras	Materiais porosos	Materiais porosos	Material poroso / aconselhável para solos	Materiais porosos	Materiais porosos
5 - Custo de equipamento	Elevado	Intermédio	Baixo	Baixo	Elevado	Elevado	Muito elevado	Muito elevado

Métodos Parâmetros	Gravimétrico	Carbonato De Cálcio	Resistência Elétrica	Capacitância	Micro- ondas	TDR	Raios Gama	NMR
6 - Equipamento portátil com aplicação <i>in situ</i>	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
7 - Precisão	Elevada	Satisfatória	Reduzida / (Satisfatória para madeira)	Reduzida	Boa	Boa	Elevada	Elevada
8 - Perfil de humidade	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
9 - Reutilização da amostra	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
10 - Facilidade de execução	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil	Intermédia	Difícil	Fácil
11 - Facilidade de interpretação	Fácil (Laborioso)	Média	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil	Difícil	Fácil
12 - Documentos normativos	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não



Parâmetros \ Métodos	Gravimétrico	Carbonato De Cálcio	Resistência Elétrica	Capacitância	Micro-ondas	TDR	Raios Gama	NMR
13 - Afetado pelas descontinuidades de material	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
14 - Afetado por irregularidades da superfície	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não
15 - Afetado pela presença de sais e metais	Não	Não	Sim	Não	Sim (Pouco)	Sim (Pouco)	Sim	Sim
16 - Afetado pela humidade superficial	Não	Não (Mede superficialmente)	Não (Mede superficialmente)	Sim	Não	Não	Não	Não
17 - Proteção necessária	Não	Sim (presença de acetileno)	Não	Não	Não	Não	Sim (Radiação)	Não
18 - Mede água de ligação	Possível (T> 103±2°C)	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim

# 4

## APLICAÇÃO A UM CASO DE ESTUDO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE HUMIDADE

### 4.1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal da aplicação experimental é a análise do método de capacitância aplicado a materiais de construção correntes. Com esta finalidade, utilizaram-se dois equipamentos distintos com base na mesma metodologia, aplicado a dois casos de estudo. Os equipamentos utilizados foram:

- Humidímetro;
- Protimeter MMS2.

Os valores dos teores de humidade, resultantes da aplicação de ambos equipamentos, são comparados através do mapeamento de zonas húmidas. O tratamento de dados é realizado com recurso a uma ferramenta de cálculo, MATLAB.

Desta forma, com a obtenção de valores resultantes da aplicação destes ensaios experimentais é esperada a possibilidade de obtenção de um parecer quanto à sensibilidade, adequabilidade e fiabilidade destes dois equipamentos.

### 4.2. INTRODUÇÃO À FERRAMENTA DE CÁLCULO PARA MAPEAMENTO DE HUMIDADES

#### 4.2.1. O QUE É O MATLAB?

O MATLAB é um programa informático de linguagem de alto desempenho que utiliza um software de computação numérica de análise e visualização de dados. Dentro das suas distintas potencialidades, integra: computação, visualização e programação num ambiente de uso fácil e intuitivo, onde problemas e soluções são expressas em notação matemática típica.

Esta ferramenta é, habitualmente, utilizada para simular situações relacionadas com:

- Análise matemática;
- Visualização de gráficos científicos e de engenharia;
- Exploração e desenvolvimento de aplicações de gráficas;
- Análise dos dados;
- Computação nomeadamente desenvolvimento de algoritmos;

- Modelagem, simulação e prototipagem.

Esta ferramenta é um sistema interativo cujo elemento básico de dados é uma matriz que não requer dimensionamento. Assim sendo, o programa permite que a resolução de muitos problemas de computação técnica, especialmente aqueles com formulações matriciais e vetoriais.

#### 4.2.2. SIMULAÇÃO GRÁFICA

A versão MATLAB R2013b foi a utilizada para o presente estudo, sendo a apresentação da interface a seguinte:

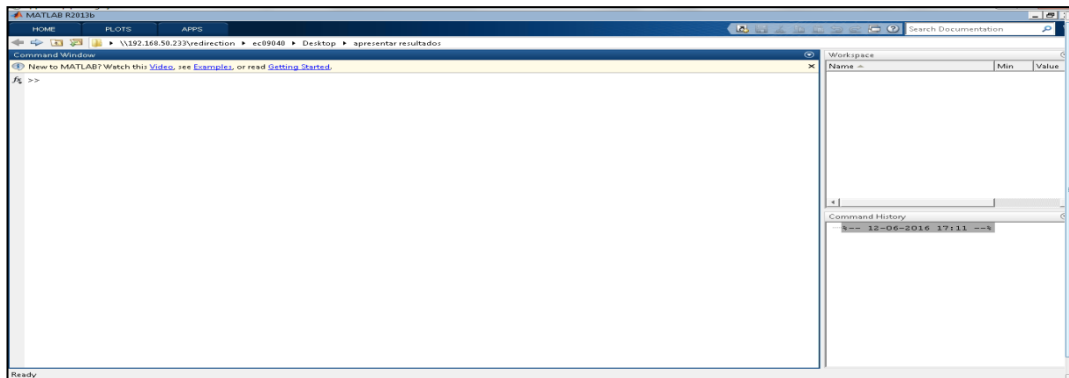


Fig. 47 – Interface do programa MATLAB

A interface desta ferramenta é composta por:

- Uma janela de comandos (command window) - local onde as operações podem ser feitas diretamente em linguagem matemática tradicional;
- Barra de trabalho (workspace) – espaço onde é possível visualizar o nome, valor e classe das variáveis criadas e salvas em memória;
- Histórico de comandos (command history) – lista de comandos utilizados. A lista é organizada por data de execução e permite que o comando desejado seja novamente utilizado através de um duplo clique.
- Separador “Home” – local onde existem vários subcomandos básicos de gravação, importação, edição de ficheiros, variáveis e códigos.
- Separador de gráficos (Plots) – local onde é possível selecionar o tipo de gráfico que se deseja em função das variáveis selecionadas.
- Separador de aplicações (Apps) – local onde é possível criar variadas aplicações.

O MATLAB opera principalmente com um tipo de objeto, isto é, uma matriz numérica retangular que está preparada para abranger elementos complexos se necessário. Um valor escalar diz respeito a uma matriz de dimensão 1x1 e um valor vetorial diz respeito a uma matriz que possui unicamente uma linha ou uma coluna. O método mais fácil de inserção de matrizes pequenas é utilizando uma lista explícita de comandos. Os elementos de cada linha da matriz são separados por espaços em branco ou vírgulas e as colunas separadas por ponto e vírgula. À volta do grupo de elementos que formam a

matriz é introduzida parenteses retos de modo a limitá-la. Quando se introduz um comando no MATLAB este tem de vir antecedido pelo símbolo de percentagem (%).

As funções matriciais e respetivos comandos mais usados em MATALAB, com o objetivo de mapeamento são as seguintes:

Comando	Descrição
inv	Inversa;
rot90(A)	Roda a matriz em sentido anti-horário;
fliplr(A)	Coloca a matriz da esquerda para a direita;
flipud(A)	Coloca a matriz A de “cabeça para baixo”;

Contudo, quando as matrizes são demasiado extensas, ou seja, de dimensão superior a 10x10, não é possível a sua introdução através de comandos introduzidos manualmente na janela de comandos. Deste modo é necessário importar uma tabela de dados. Os dados são introduzidos noutra programa, por exemplo o Excel e importados no MATLAB. Para a introdução da referida tabela (construída no Excel por exemplo) clica-se no comando Home, e seguidamente no subcomando Import Data.

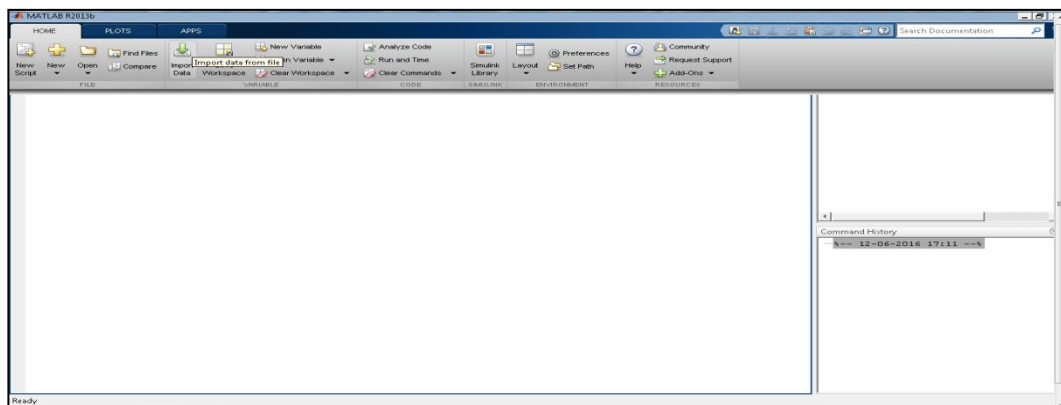


Fig. 48 - Interface do programa MATLAB

É necessário escolher o diretório do local onde se guardou a pasta no computador (File name), e abrir o respetivo ficheiro (open).

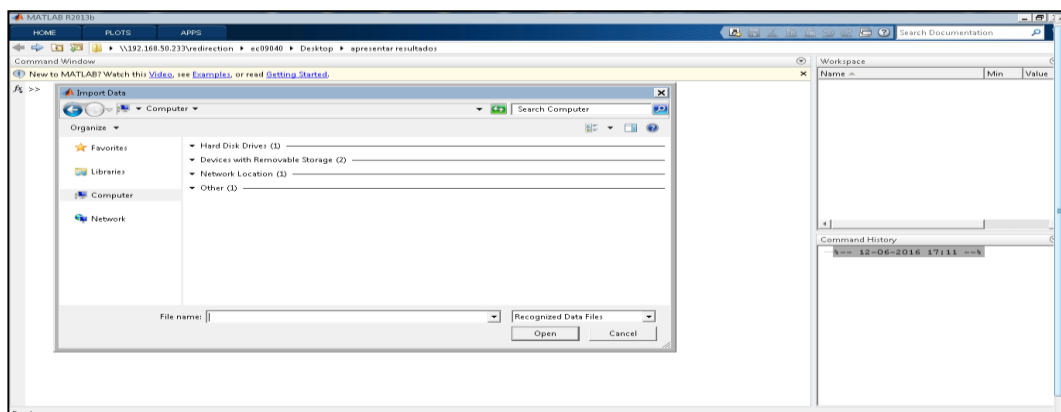


Fig. 49 – Programa MATLAB

Seguidamente o programa abre uma folha de cálculo com a importação da tabela que se deseja e seleciona-se o número de células pretendidas para análise através da seleção do rato juntamente com o comando Ctrl shift ou através da janela do canto superior esquerdo “range” na qual se seleciona a células pretendidas. No âmbito de mapeamento seleciona-se a opção “ Matriz” e clica-se no ícone “Import Selection” para que a matriz escolhida seja guardada como uma variável no espaço de trabalho (Workspace) e fique portanto na memória do programa.

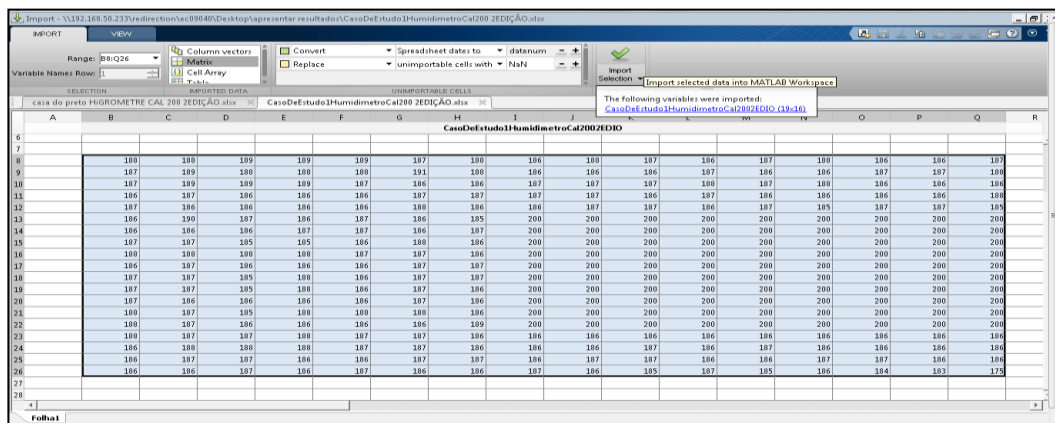


Fig. 50 - Programa MATLAB

A matriz importada está agora sob forma de uma variável com o nome do ficheiro escolhido no espaço de trabalho (Workspace). Neste espaço é possível observarmos para além do nome da variável, o valor mínimo, máximo e dimensão da matriz.

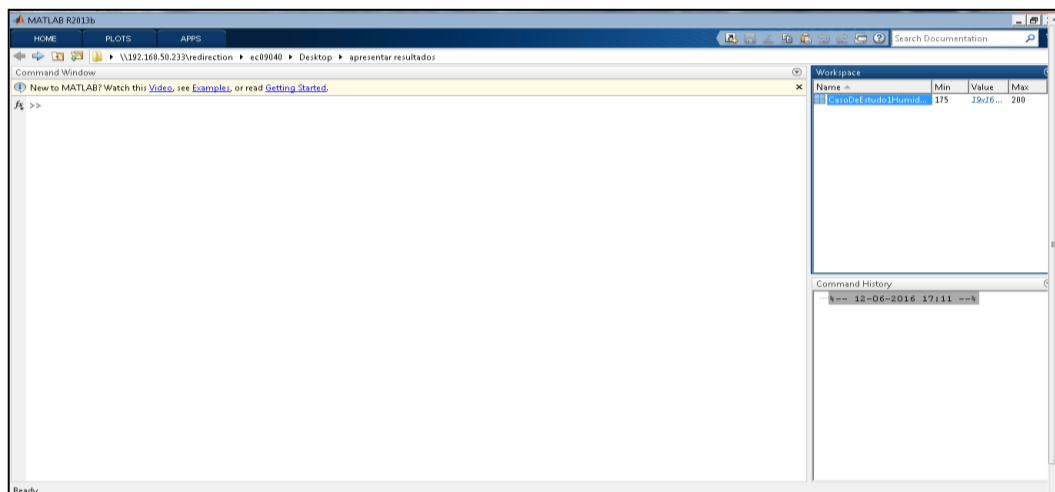


Fig. 51 - Programa MATLAB

Para o objetivo final (mapeamento) os gráficos constituem um essencial recurso visual para a interpretação de dados e respetivo diagnóstico de patologias. O MATLAB tem a capacidade de possuir um elevado número de interpretações gráficas, através de funções e comandos. É possível obter gráficos bidimensionais ou tridimensionais com a respetiva escala. Nos gráficos de contorno é desenhado um gráfico resultante de uma matriz  $z$ , onde  $z$  é a altura em relação ao plano  $x$ - $y$ . A matriz  $z$  tem de ser de dimensão superior a  $2 \times 2$  e tem de conter pelo menos duas variáveis. Os números de linhas de contorno são escolhidos automaticamente pelo programa em função dos valores máximos e mínimos da matriz

bidimensional z. Os comandos frequentes para representar gráficos bidimensionais deste tipo para a finalidade de mapeamento são:

Comando	Descrição
<code>%contour(z,'Fill');</code>	Para criar um gráfico de contornos preenchidos. Onde z é a matriz.
<code>% xlim(axes1,[1 n]);</code>	Para estabelecer os limites dos eixos. Em que n=1,2,3...
<code>% ylim(axes1,[1 m]);</code>	Para estabelecer os limites dos eixos. Em que m=1,2,3...
<code>box(axes1,'on')</code>	Para colocar uma caixa de eixos no gráfico.

No entanto, alternadamente a introduzir-se os comandos na janela de comandos, o programa possibilita criar diretamente e automaticamente um gráfico da matriz. Ao seleccionar a variável na área de trabalho (Workspace) e seguidamente clicar no separador gráficos (“Plots”), surgem vários de tipo de gráficos possíveis. O gráfico que foi utilizado para o mapeamento é o de linhas de contornos “contour”.

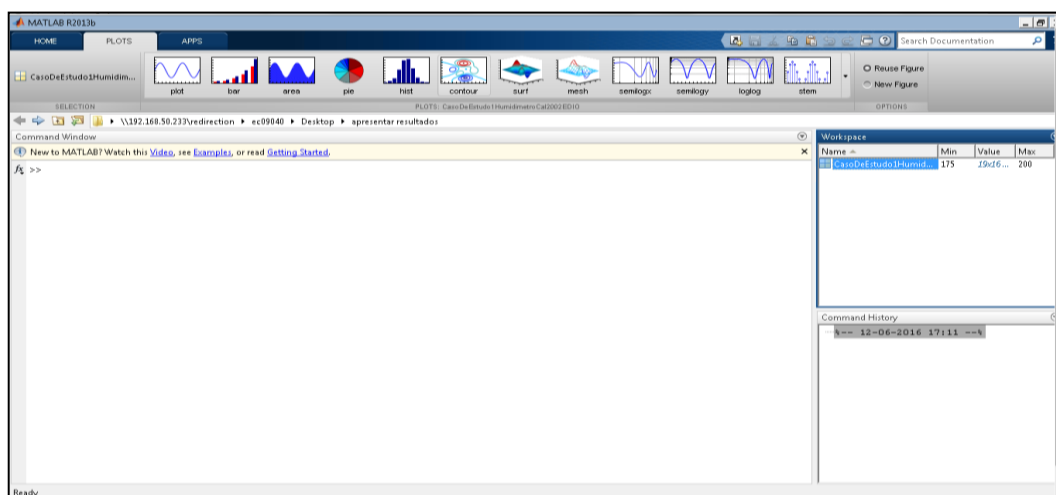


Fig. 52 - Programa MATLAB

Depois de escolher o tipo de gráfico surge uma nova janela com o gráfico gerado:

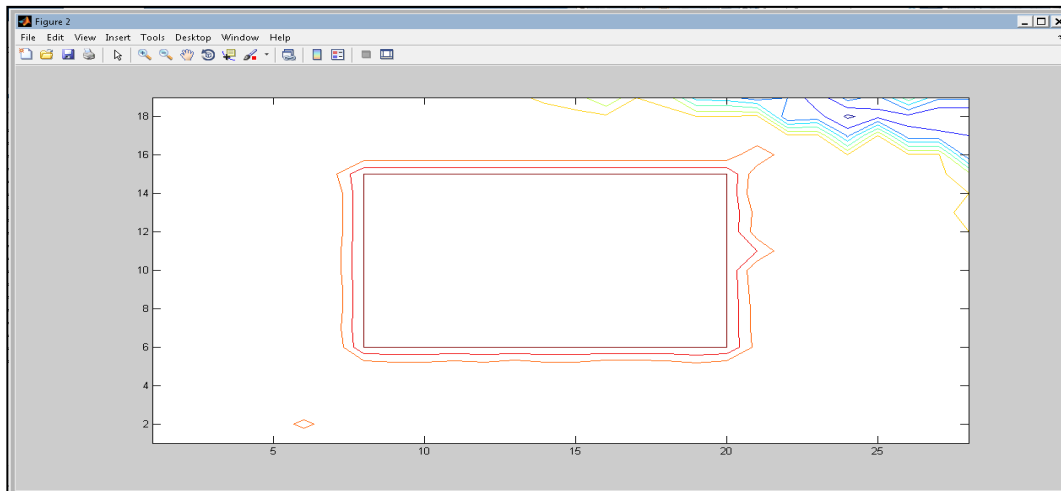


Fig. 53 - Programa MATLAB

No entanto este gráfico gerado ainda não está explorado de acordo com o objetivo final. Para que o gráfico fique intuitivo e de possível interpretação é necessário:

- Preencher os contornos - Através da função “view” na barra de ferramentas que se encontra na horizontal e na parte superior da janela. Seguidamente ativar o subcomando “Plot Browser” e seleccionar as linhas de contorno com um duplo clique. Colocar um visto na opção “Fill” para o respetivo preenchimento. É possível ainda seleccionar o tipo de linha e a espessura da linha no comando “Line”, assim como no “Show Text” para apresentar os valores dos pontos

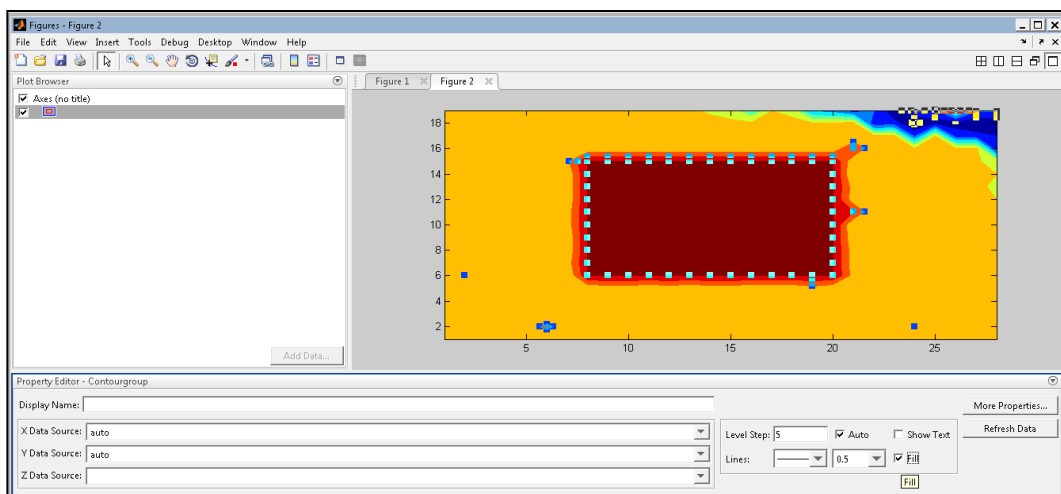


Fig. 54 - Programa MATLAB

- Dimensionar os limites dos eixos – Selecionar na janela “Plot Browser” a opção “Axes” e deste modo abre-se automaticamente a janela “Property Editor – Axes. Nesta tabela é possível escolher o eixo x, y e z, nos separadores “X Axis”, “Y Axis” e “Z Axes” respetivamente. Depois de escolher o eixo a editar se selecionar a opção “Ticks” surge uma nova janela chamada “Edit Axes Ticks”, onde se pode escolher a localização e espaçamento dos eixos. Se quisermos colocar espaçamentos com saltos fixos de um determinado valor selecionamos a opção “Setp by” e coloca-se o valor que pretendemos com ajustamento automático ao seleccionarmos a opção “Auto”. É necessário ainda inverter o eixo Y através de uma matriz inversa, para que a imagem corresponda á realidade. Assim sendo, na janela anterior, “Property Editor – Axes), no separador “Y Axis”, o inverso do eixo Y é obtido através da seleção da opção “Reverse” com um visto.

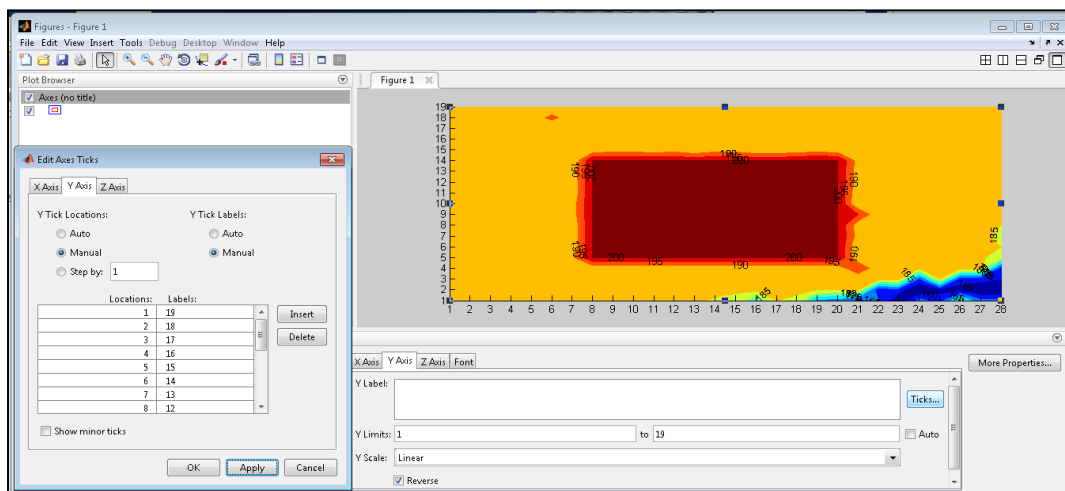


Fig. 55 - Programa MATLAB

- Apresentar uma escala de cores – A escala de cores é obtida através da seleção da opção “Insert” e como subopção “colorbar”. A localização da escala de cores pode ser alterada na janela “Property Editor-colorbar” no subcomando “Location”. Quando a escala de cores surgir basta selecionar com o botão direito do rato na escala de cores e selecionar a opção “Open colormap editor” para selecionar os intervalos de cores e valores máximos e mínimos.



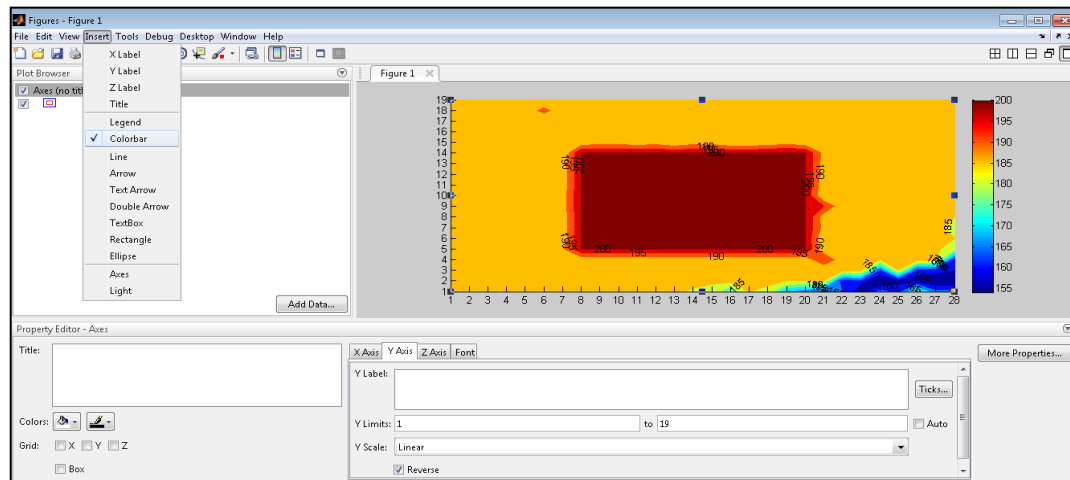


Fig. 56 - Programa MATLAB

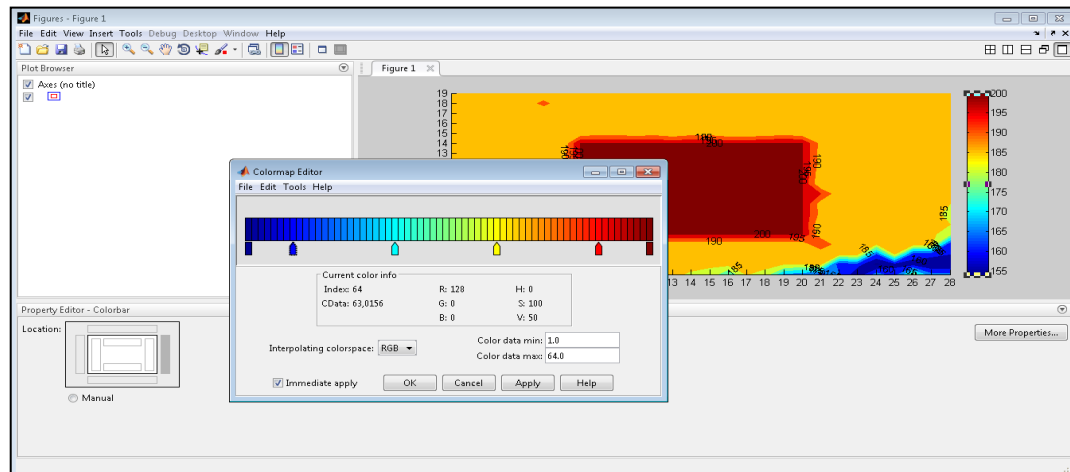


Fig. 57 - Programa MATLAB

- Colocar uma grelha no gráfico – para colocação da grelha é necessário seleccionar os vistos na opção “Grid” na janela “Property Editor – Axes”. Para alteração da cor das grelhas selecciona-se a opção “colors” e escolhe-se a cor desejada.

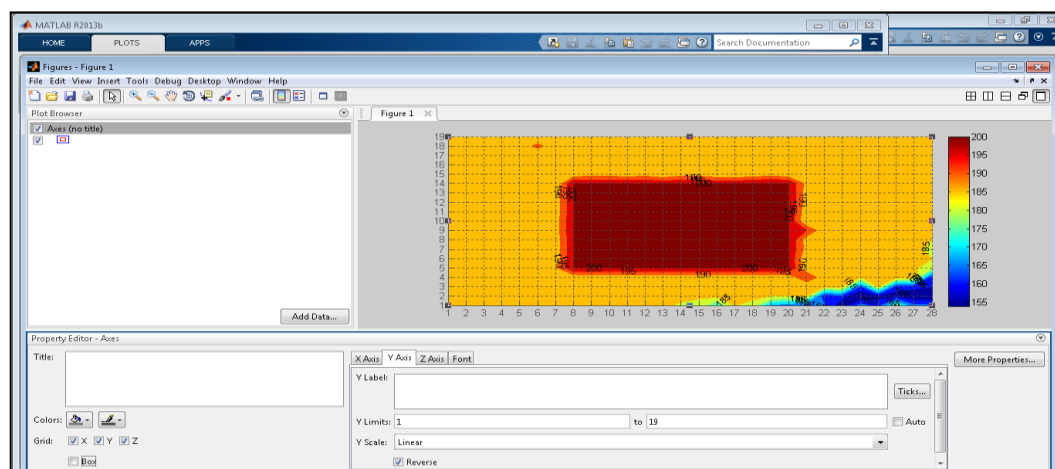


Fig. 58 - Programa MATLAB

Deste modo é possível obter um gráfico bidimensional ilustrativo do mapeamento de áreas húmidas.

### 4.3. APRESENTAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

#### 4.3.1. CASO DE ESTUDO 1 (P1) – IDENTIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO

##### 4.3.1.1. CARACTERIZAÇÃO CONSTRUTIVA E FUNCIONAL

A habitação situa-se na rua da Varziela na Freguesia de Árvore que pertence ao concelho de Vila do Conde, com data de construção em 1998. O edifício habitacional é composto por 3 quartos, uma garagem e um piso no rés-do-chão habitacional. O piso de rés-do-chão é formado por uma cozinha, uma sala de estar, duas casas de banho e três quartos. A estrutura do edifício é uma estrutura porticada em betão armado. As fundações são diretas em betão armado onde existem também lintéis de bordadura. As lajes de piso e de cobertura são aligeiradas. A cobertura é inclinada com um desvão não habitável. A telha é ondulada. A envolvente exterior é constituída por paredes duplas de tijolo de 11, com caixa-de ar de 10 cm sem isolamento térmico. As divisórias interiores são paredes de tijolo 15 com reboco 2 cm de ambos os lados. As paredes são pintadas com tinta branca e os tetos são caiados. Os vãos exteriores são constituídos por portas em alumínio (à exceção da porta principal que é em madeira) e envidraçados com vidro duplo e caixilharia basculante em alumínio. Existe contacto direto entre as paredes do edifício e o solo (jardim). As fundações são diretas com sapatas isoladas, uma em cada pilar. O abastecimento de água é feito por poço próprio e como através de rede pública quando é necessário. O poço contém uma bomba submersível com um motor trifásico. As tubagens de abastecimento da casa é em aço inox e não estão embutidas nas paredes.

##### 4.3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DA PATOLOGIA

A patologia localiza-se no paramento interior de uma parede de fachada num compartimento principal, isto é, num dos quartos virados a norte.

Manchas pretas na parte superior da parede e teto. Aparecimento de água no estado líquida na parede do paramento interior da parede de fachada (Fig. 59).



Fig. 59 - Compartimento principal voltado a norte onde existe manifestações de humidades (P1)

#### 4.3.2. CASO DE ESTUDO 2 (P2) – IDENTIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO

##### 4.3.2.1. L CARACTERIZAÇÃO CONSTRUTIVA E FUNCIONAL

A habitação situa-se na rua do 16 de Maio e pertence ao concelho de Oliveira de Azeméis, com data de construção em 1999.

##### 4.3.2.2. CARACTERIZAÇÃO CONSTRUTIVA E FUNCIONAL

O edifício habitacional é formado por um piso rés-do-chão constituído por uma cozinha, uma sala de estar, duas casas de banho e 3 quartos e um sótão habitável, com uma área total de implantação de 140m<sup>2</sup> e uma área de construção de 255m<sup>2</sup>. As vigas, pilares, varandas, padieiras e beirais são constituídos de betão armado, sendo as lajes dos pavimentos, teto e cobertura realizadas em betão pré-esforçado. As paredes exteriores duplas são constituídas por tijolo de 15cm no pano exterior, caixa-de-ar de 5cm com isolamento de poliestireno expandido de 2cm de espessura e tijolo de 7cm no pano interior. Paredes interiores em tijolo de 7cm, rebocadas com argamassa de cimento e areia. A cozinha, sala de estar e quartos de banho possuem um revestimento em tijoleira de 1ª qualidade assente em pavimentos nivelados e regularizados com argamassa de cimento e areia. Nos quartos e hall de distribuição o revestimento é em parqué de carvalho. As paredes exteriores são pintadas com uma tinta plástica sobre uma camada de reboco de cimento e areia fina. As paredes interiores são pintadas a cor branca e com tinta plástica aquosa. As paredes da cozinha e quartos de banho revestidas a azulejos em toda a sua altura, aplicados sobre argamassa de cimento, areia e cal hidráulica. Todos os tetos são de estuque e pintados com solução de cal. Os vãos exteriores são constituídos por caixilharias de vidro simples em madeira de sucupira e interior em madeira de mogno. A Cobertura em telha a duas águas com ripado de argamassa assente sobre lajes aligeiradas. A água é fornecida por um poço privado e o saneamento depositado em fossa séptica. O nível freático é elevado e por isso existe uma bomba para extração de água freática.

#### 4.3.2.3. CARACTERIZAÇÃO DA PATOLOGIA

A patologia localiza-se no paramento interior de uma parede de fachada num compartimento principal, isto é, num dos quartos virados a norte. Observam-se eflorescências e destacamento da tinta (Fig. 60 e Fig. 61).



Fig. 60 – Patologia evidenciada na parede do caso de estudo 2 (P2)



Fig. 61 - Patologia evidenciada na parede do caso de estudo 2 (P2)

#### 4.4. METODOLOGIA GERAL

Para a realização do ensaio de medição do teor de humidade, as condições de utilização dos compartimentos foram mantidas constantes, previamente e durante o ato de medição, de modo a tentar aproximar cada simulação das condições reais.

Foi necessário marcar os pontos de medição para que seja possível comparar resultados e testar sensibilidades de ambos os aparelhos aplicados a cada situação. Estas leituras foram efetuadas numa malha de 10 cm, isto é, são espaçados de 10 cm, tanto na direção vertical como na horizontal.

Os equipamentos foram calibrados para o tipo de material em estudo. Nos casos do Protimeter a calibração é automática. No Humidimètre CEBTP MX-HU calibrou-se para o valor de 200, este que é o valor aconselhado pelo manual de instruções do equipamento.

Os equipamentos foram colocados no compartimento onde a anomalia se verifica cerca de 30 minutos antes de se iniciar o registo de medições.

Aplicou-se um contacto firme e consistente com a superfície do material durante 2 a 3 segundos e registaram-se as medições dos vários pontos correspondentes aos intervalos de espaçamento.

Utilizou-se uma ferramenta de cálculo especificada previamente, MATLAB, para o mapeamento de zonas húmidas. Assim sendo, a distribuição de humidade é evidenciada através de um gráfico bidimensional com uma escala de teores de humidade colorida.

## **4.5. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

### **4.5.1. HUMIDIMÈTRE CEBTP MX-HU**

Este equipamento elétrico de deteção do teor de humidade tem como base de funcionamento a variação das propriedades dielétrica dos materiais (abordado no capítulo 3). Na parte de trás do equipamento está localizada uma sonda protegida por um material mau condutor (plástico ou borracha) para evitar que as leituras sejam influenciadas. Esta proteção confere ainda um melhor contacto entre o equipamento e a superfície do material em teste. A referida sonda é formada por dois anéis concêntricos que permitem uma leitura em profundidade de 3 a 5 cm. Na parte lateral direita do equipamento encontra-se um botão de ajuste do valor de calibração. O manual do presente equipamento sugere um valor de calibração de 200. Assim sendo, quanto mais próximo de 200 estiverem as leituras, mais seco se encontra o material testado. À medida que as leituras se afastam de 200, significa que o material encontra-se progressivamente mais húmido. Na parte lateral esquerda, encontra-se o botão de ligação do aparelho.

O procedimento de medição deste aparelho é semelhante ao descrito no capítulo 3.6.4, contudo este equipamento tem umas especificidades singulares nomeadamente:

- Calibrar o aparelho, através do referido botão lateral (direito) para o valor de 200
- Aconselha-se a colocação do aparelho próximo do local de medição, aproximadamente 30 minutos antes de se iniciarem as medições;
- Limpar com um pano seco o equipamento antes de se iniciarem as medições
- Confere-se novamente o valor de calibração, caso já não esteja nos 200, calibra-se novamente;

Após a realização dos procedimentos anteriores é possível começar a registar leituras premindo o botão de ligação e encostando a parte de trás do equipamento na superfície do material em teste. Após alguns segundos de estabilização, o valor é apresentado no mostrador.



Fig. 62 – Humidimètre CEBTP-MXU

O equipamento é acompanhado pelas curvas de calibração para três materiais distintos, nomeadamente para betão, argamassa e gesso (Fig. 63). Assim sendo, através das leituras registadas pelo equipamento é possível determinar por correlação, o teor de humidade em percentagem de água por unidade de volume.

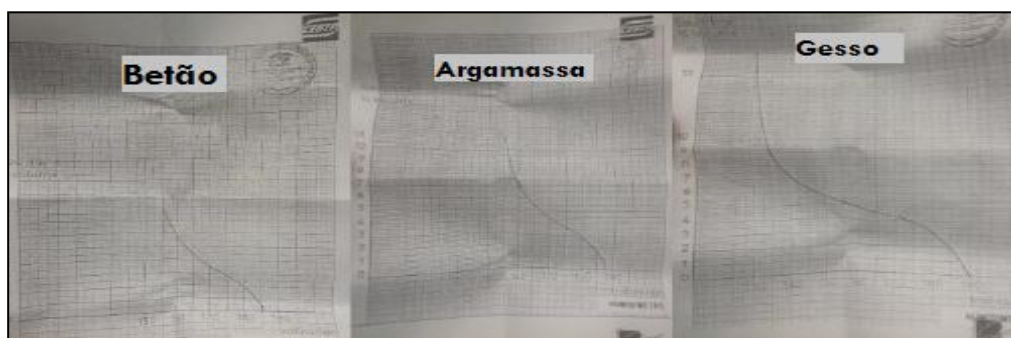


Fig. 63 – Curva de calibração para materiais distintos (betão, argamassa, gesso) [63]

Este equipamento é utilizado normalmente para detetar humidade em materiais porosos que possuam superfícies planas sem protuberâncias

#### 4.5.2. PROTETER MMS2

O presente equipamento elétrico é multifuncional, no sentido em que permite a realização de medições de vários parâmetros, na qual estão subjacente diferentes métodos de medição. Disponibiliza modos de funcionamento para medição de parâmetros, tais como:

- Humidade relativa;
- Temperatura do meio ambiente;
- Temperatura do material de construção;
- Teor de humidade com base em métodos de resistência elétrica;

- Teor de humidade com base em métodos de variação das propriedades dielétricas.

Contudo as medições realizadas para os ensaios em questão foram registadas com o modo de operação “pinless”, isto é, baseado na variação das propriedades dielétricas do material. O aparelho possui um sistema digital, deste modo controla-se todas as funções através dos botões localizados na parte frontal do aparelho. O procedimento é semelhante ao descrito para o equipamento Humidimètre, á exceção da calibração do equipamento, e da interpretação das leituras obtidas. Neste equipamento, a calibração é automática, bastando apenas seleccionar qual o tipo de lista a que o material em estudo pertence. Contudo a calibração automática é realizada somente com base em madeiras, pelo que a medição de outro qualquer tipo de material precisa de introdução manual de determinados parâmetros (teor de húmido em estado seco e húmido). O equipamento fornece leituras dos 60 aos 999, e contrariamente ao aparelho anterior, este é tanto mais húmido quanto mais próximas de 999 forem as leituras (Quadro 7).

Quadro 7 – Estado do material consoante os valores apresentados pelo Protimeter

Valor de leitura (%)	Estado
Menor que 60	-
60-170	Seco
170-22	Risco
200-999	Húmido



Fig. 64 – Protimeter MMS2

Á semelhança do equipamento anterior, este igualmente utilizado para detetar humidade em materiais porosos que possuam superfícies planas sem protuberâncias

#### 4.6. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Os ensaios foram realizados em dias diferentes, deste modo, existe a possibilidade de pequenas variações dos teores de humidade. No entanto, o facto de se terem realizado duas medições em condições semelhantes diluiu a possibilidade de eventuais erros e permite uma análise crítica sobre a possível reprodutibilidade de resultados. Foram realizadas duas medições com cada equipamento, calibrados igualmente em cada ensaio para garantir uma maior padronização de procedimentos e por consequência uma maior fiabilidade de resultados para proporcionar um correto diagnóstico.



#### 4.6.1. CASO DE ESTUDO 1 (P1) – RESULTADOS

##### 4.6.1.1. REGISTOS METEOROLÓGICOS (P1)

Os ensaios foram efetuados nos dias 10/05 e 21/05 para medições efetuadas com o Humidimètre CEBTP MX-HU. No que diz respeito aos ensaios realizados com o Protimeter MMS2, foram realizados nos dias 17/05 e 25/05.

Nas figuras seguintes estão representados, por via gráfica, os valores de algumas variáveis influenciadoras das leituras do teor de humidade, nomeadamente da temperatura e humidade relativa exterior. Estes registos foram obtidos através da estação meteorológica do LFC.

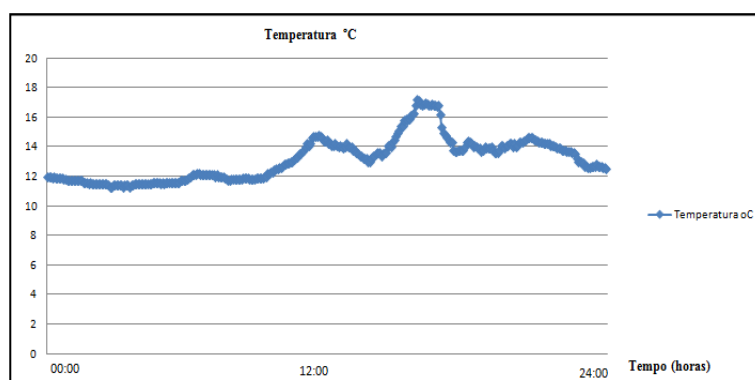


Fig. 65 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 10/05/2016

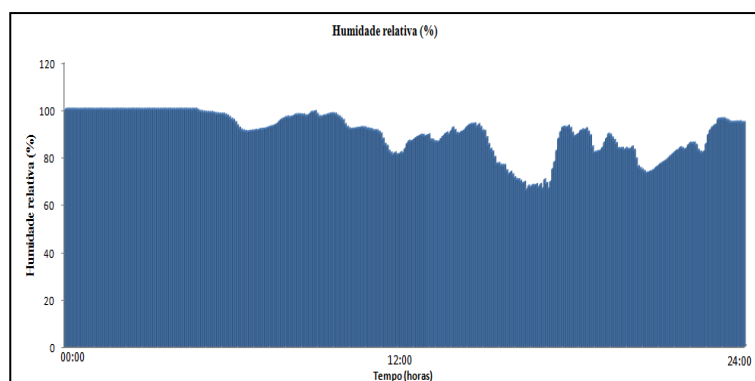


Fig. 66 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 10/05/2016



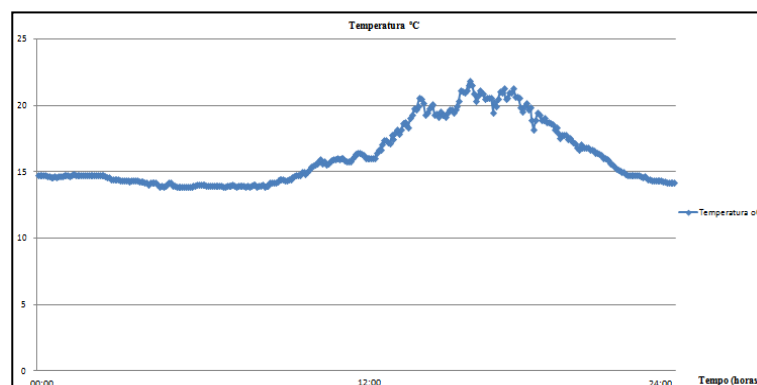


Fig. 67 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 17/05/2016

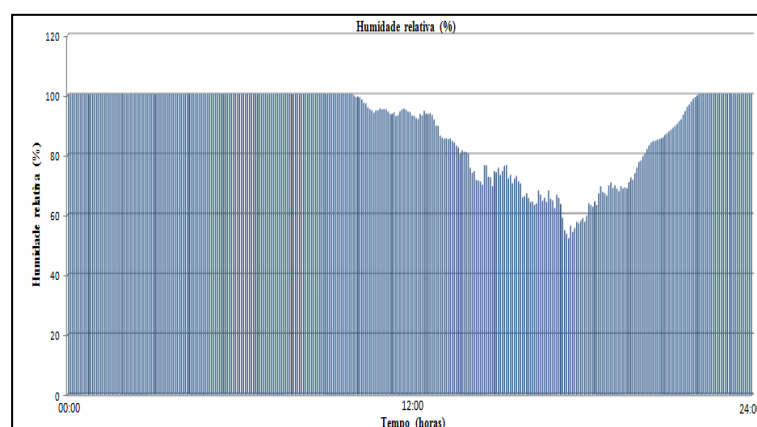


Fig. 68 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 17/05/2016

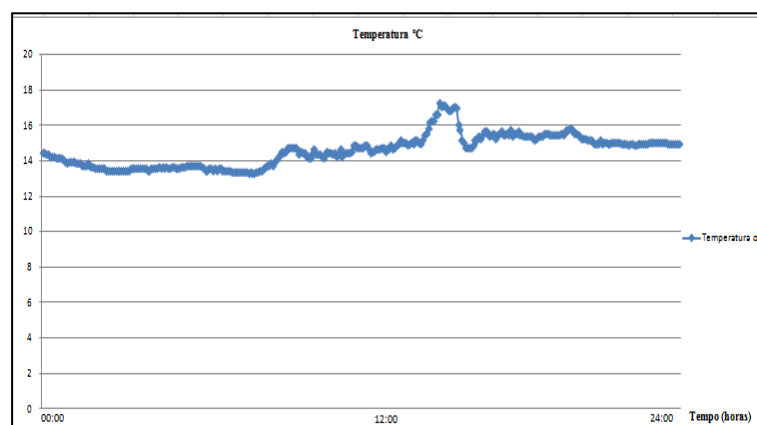


Fig. 69 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 21/05/2016

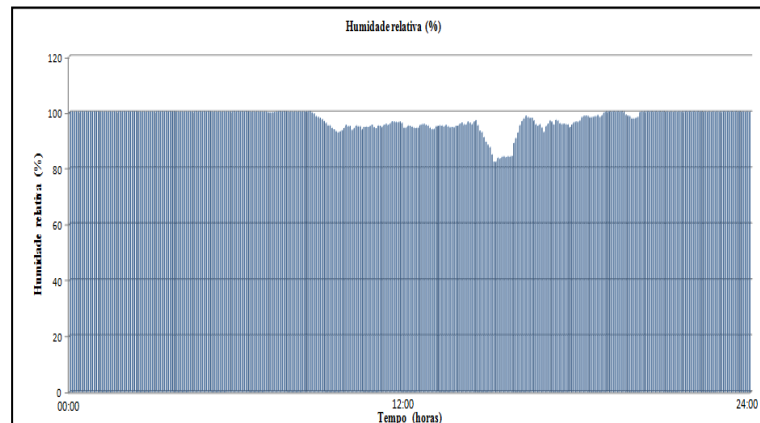


Fig. 70 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 21/05/2016

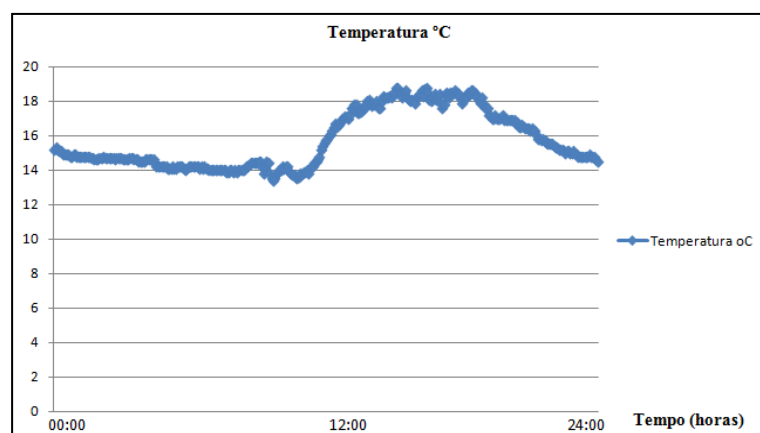


Fig. 71 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 25/05/2016

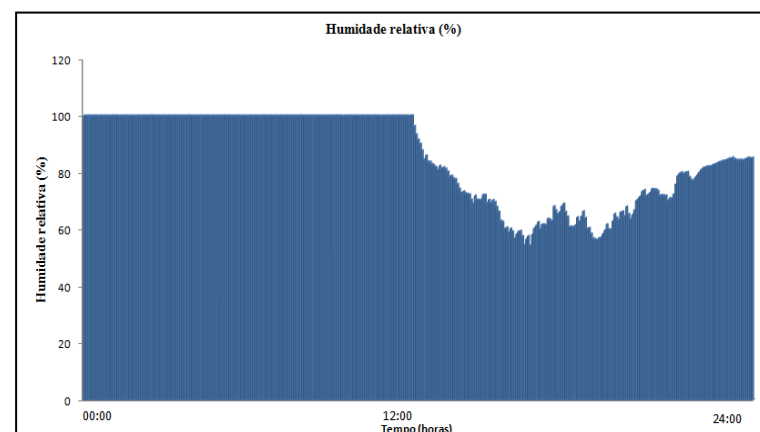


Fig. 72 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 25/05/2016

## 4.6.1.2. RESULTADOS HUMIDIMÈTRE (P1H)

Pela realização do ensaio realizado com o equipamento Humidimètre CEBTP MX-HU, calibrado para o valor de 200, os resultados das leituras obtidas estão apresentados na Fig. 73 e Fig. 74. Os valores são representados numa escala colorida correspondendo os valores azuis e vermelhos a leituras mais baixas e altas, respetivamente.

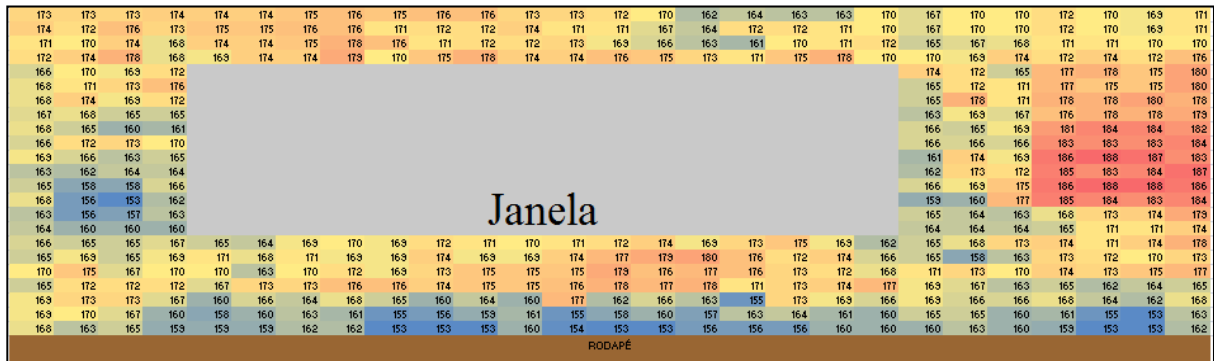


Fig. 73 - Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Humidimètre calibrado com o valor 200 (P1H1)

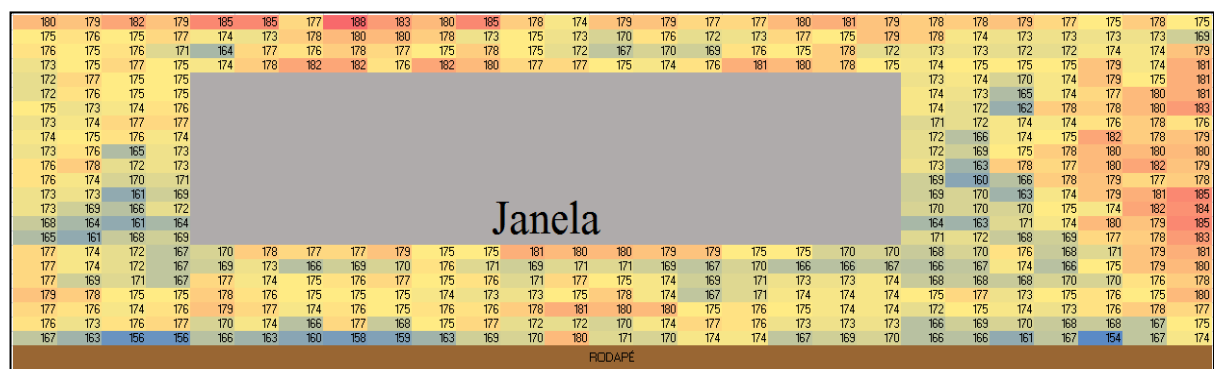
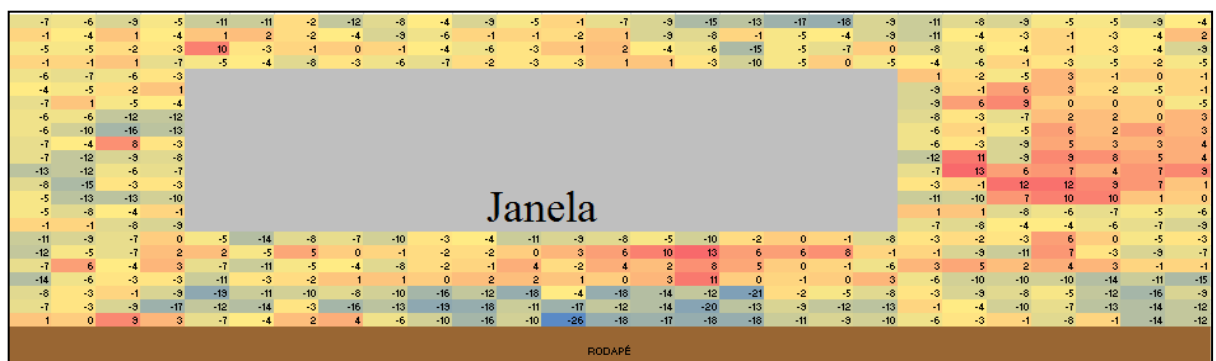


Fig. 74 - Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Humidimètre calibrado com o valor 200 (P1H2)

A diferença de valores entre o primeiro ato de medição e o segundo são representados na

Fig. 75, sendo que, os valores mais elevados em módulo correspondem a uma maior variação entre medições. Os valores negativos e positivos da parede correspondem a áreas de maior e menor humidade, respetivamente. Quanto mais próximo do valor de calibração se registarem as leituras do referido equipamento, menor é o teor de humidade. Os valores próximos de zero correspondem a leituras



semelhantes.

Fig. 75 – Diferença das leituras registadas com o Humidímetro entre o primeiro e segundo ensaio

## 4.6.1.3. RESULTADOS PROTIMETER (P1P)

Os resultados das leituras obtidas com o aparelho Protimeter estão apresentados na Fig. 76 e Fig. 77. Os valores são representados numa escala colorida correspondendo os valores azuis e vermelhos a leituras mais altas e baixas, respetivamente. Todavia, contrariamente ao equipamento anterior, leituras mais altas correspondem a valores mais húmidos.

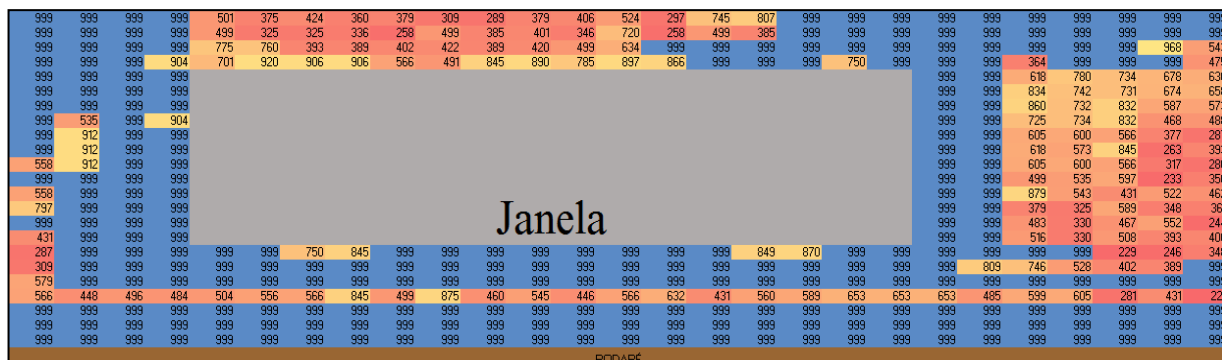


Fig. 76 - Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Protimeter MMS2 (P1P1)

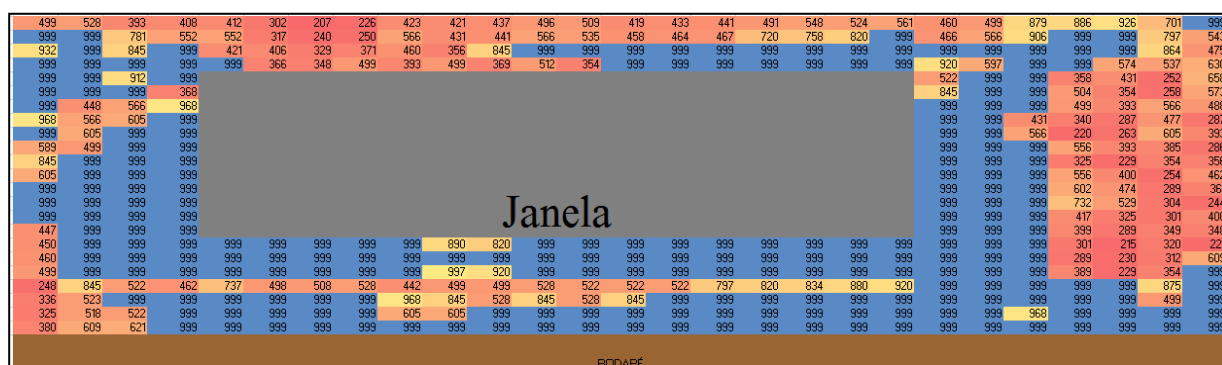


Fig. 77 - Segundo ensaio com recurso ao equipamento Protimeter MMS2 (P1P2)

A diferença de valores entre o primeiro ato de medição e o segundo são representados na Fig. 78. Os valores negativos e positivos da parede correspondem a áreas menos humidade e mais húmidas, respetivamente, visto que para o Protimeter quanto mais elevado for o valor mais húmido se encontra o elemento em ensaio.

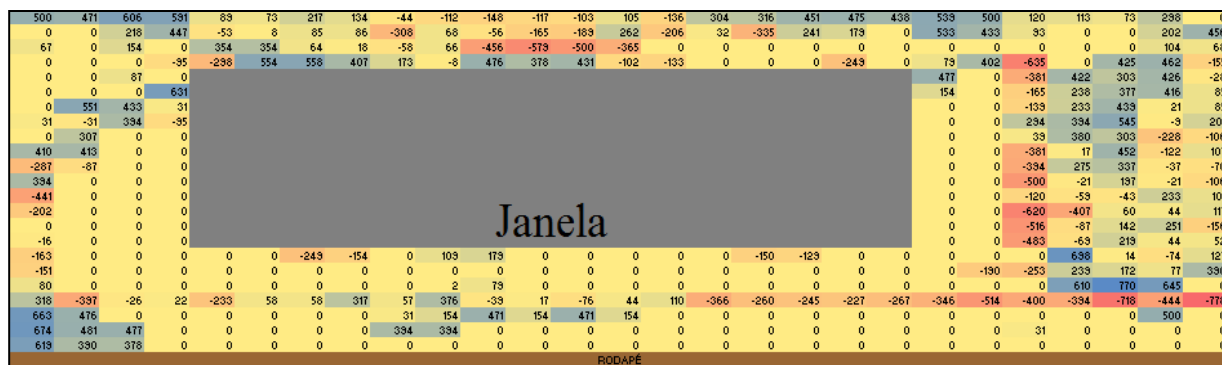


Fig. 78 - Diferença das leituras registadas com o Protimeter entre o primeiro e segundo ensaio

## 4.6.1.4. REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS – MAPEAMENTO HUMIDIMÈTRE (P1H)

Os resultados obtido pela utilização do Programa MATLAB com o intuito de mapeamento do teor de humidade são os seguintes para a situação de estudo com o equipamento Humidimètre :

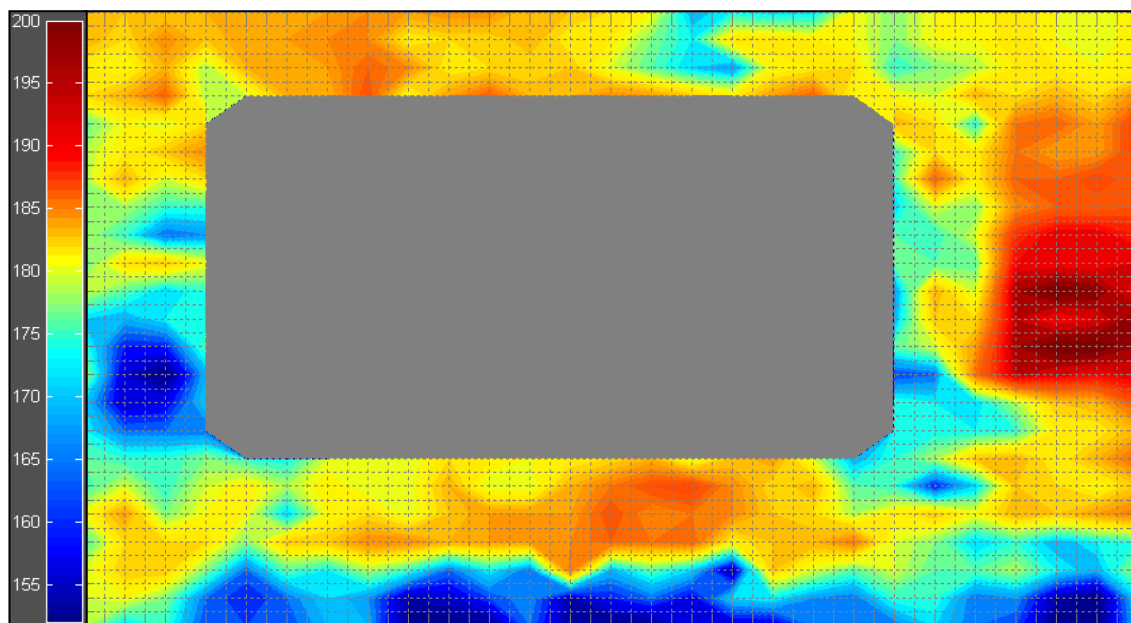


Fig. 79 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo primeiro ensaio medido com o equipamento Humidimetre calibrado para o valor de 200 (caso de estudo 1) (P1H1)

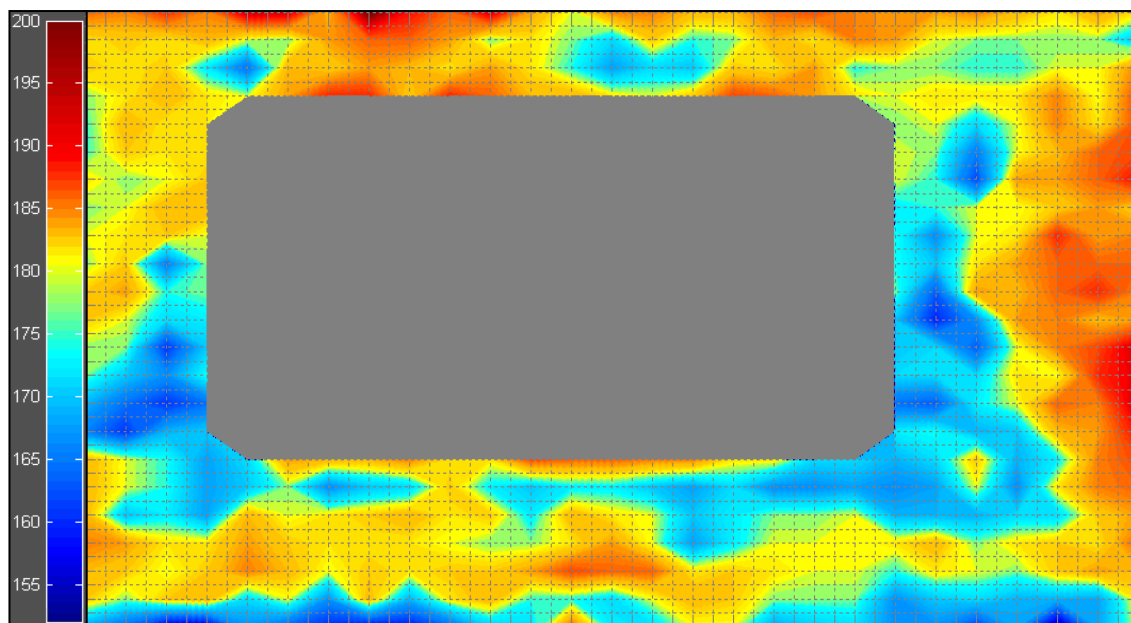


Fig. 80 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo segundo ensaio medido com o equipamento Humidimetre calibrado para o valor de 200 (caso de estudo 1) (P1H2)

#### 4.6.1.5. REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS – MAPEAMENTO PROTIMETER (P1P)

Os resultados obtido pela utilização do Programa MATLAB com o intuito de mapeamento do teor de humidade e a existência de reprodutibilidade de resultados são os seguintes para a situação de estudo com o equipamento Protimeter :

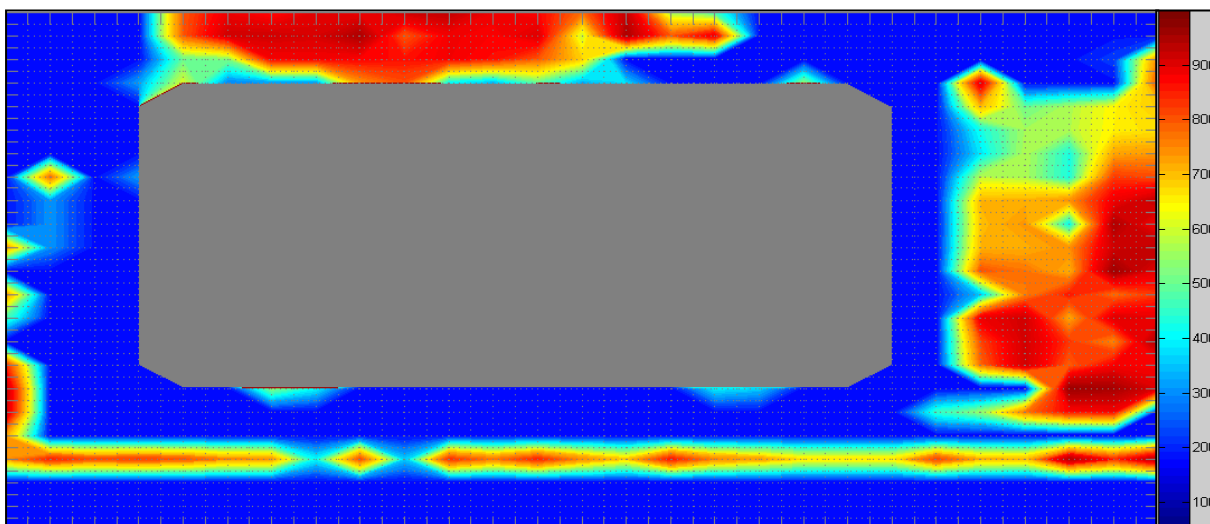


Fig. 81 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo primeiro ensaio medido com o equipamento Protimeter.(caso de estudo 1) (P1P1)

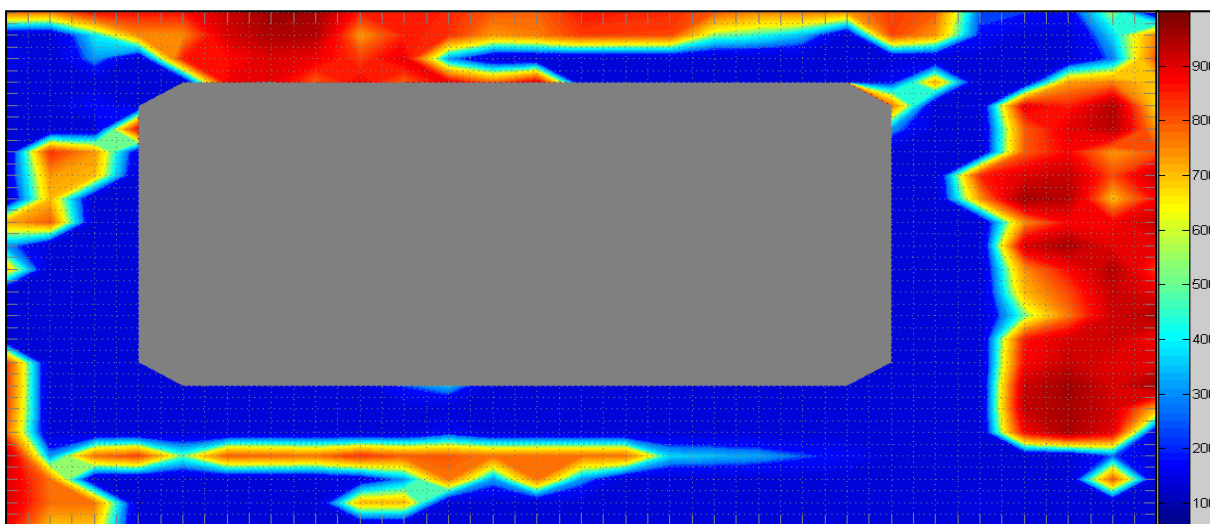


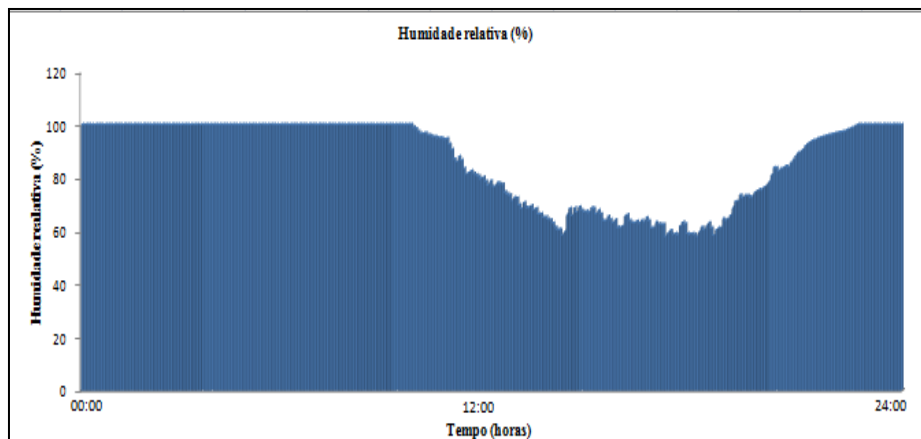
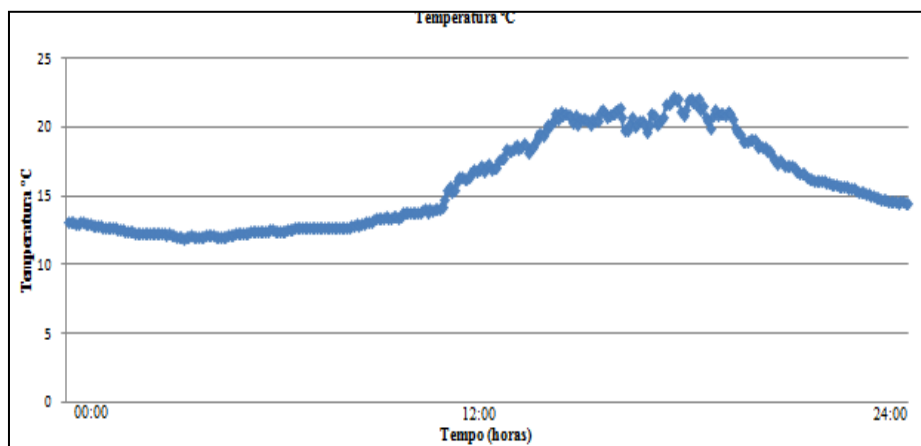
Fig. 82 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo segundo ensaio medido com o equipamento Protimeter. (caso de estudo 1) (P1P2)

#### 4.6.2. CASO DE ESTUDO 2 – RESULTADOS

##### 4.6.2.1. REGISTOS METEOROLÓGICOS (P1)

Os ensaios foram efetuados nos dias 15/05 e 22/05 para medições efetuadas com o Humidimètre CEBTP MX-HU. No que diz respeito aos ensaios realizados com o Protimeter MMS2, foram realizados nos dias 18/05 e 06/05.

Nas figuras está representado, por via gráfica, uma pesquisa das condições meteorológicas registadas pela estação meteorológica do LFC nos dias de medições. As variáveis influenciadoras das leituras do teor de humidade analisadas são: a temperatura e humidade relativa exterior.



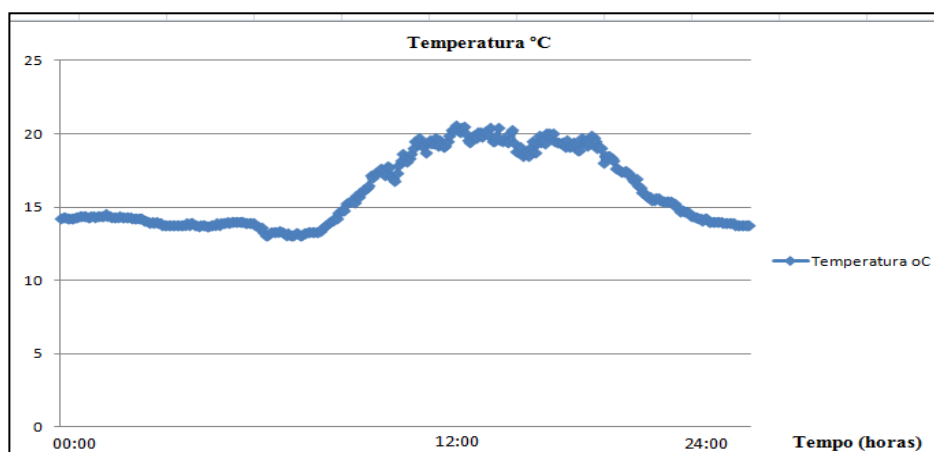


Fig. 85 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 18/05/2016

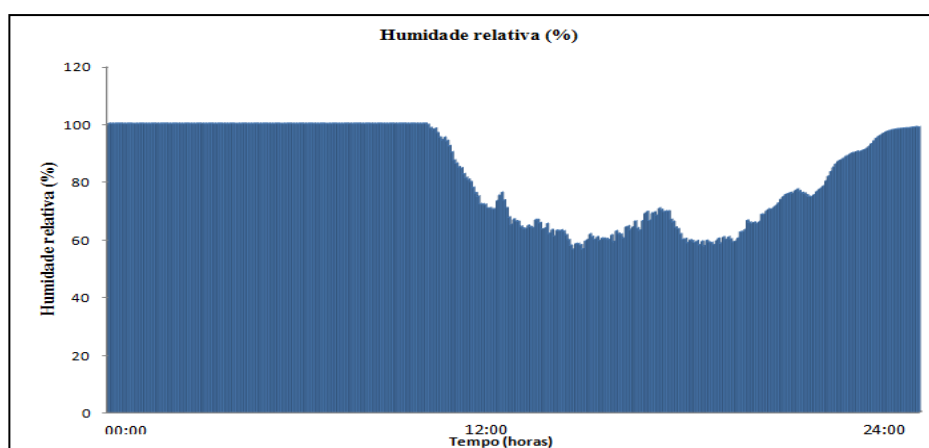


Fig. 86 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 18/05/2016

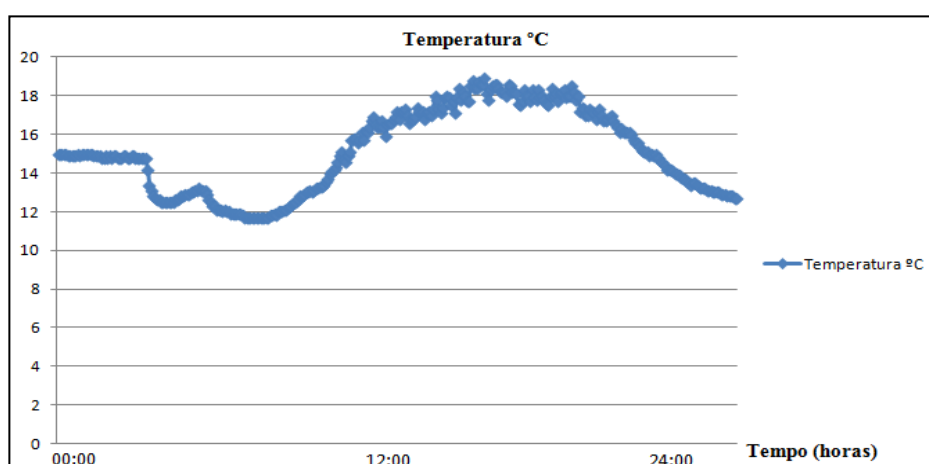


Fig. 87 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 22/06/2016



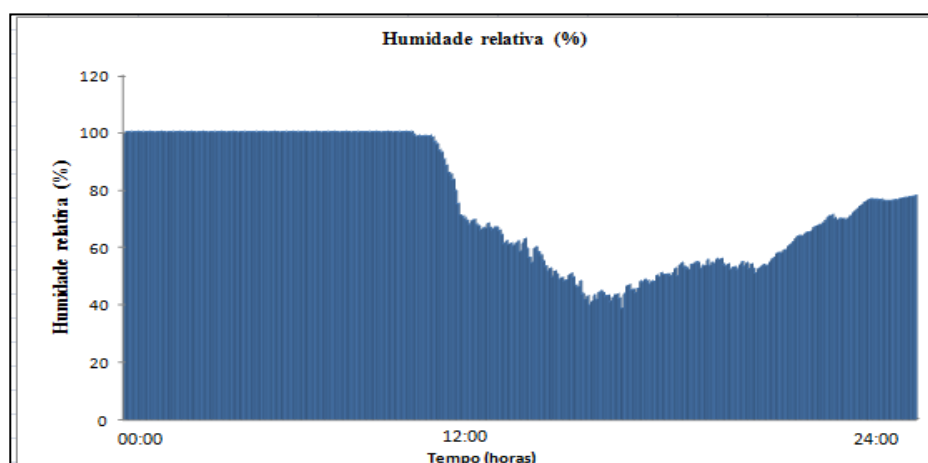


Fig. 88 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 22/05/2016

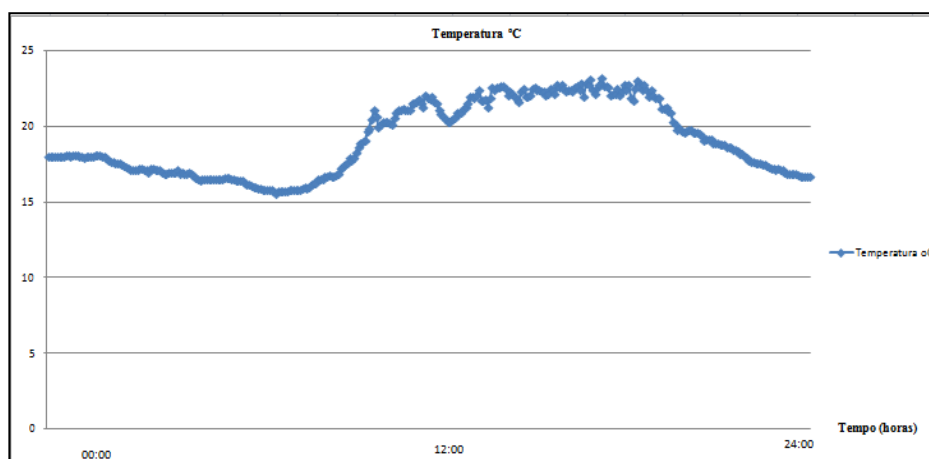


Fig. 89 - Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 06/06/2016

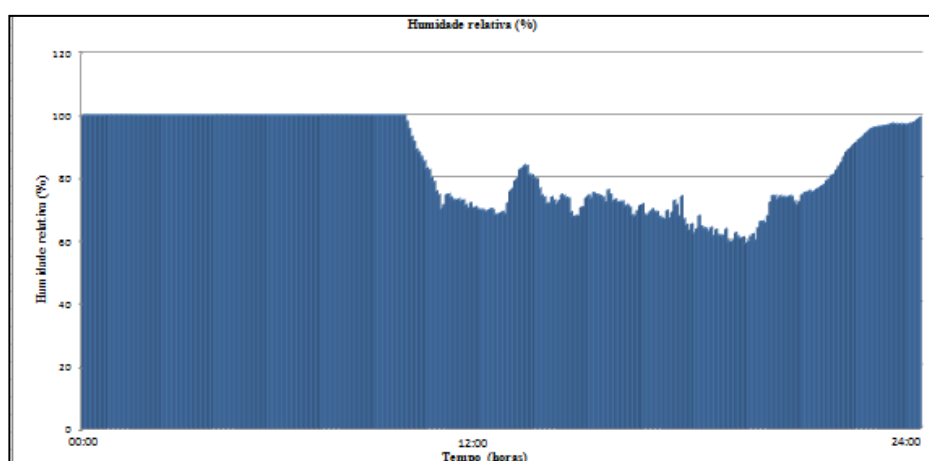


Fig. 90 - Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 06/06/2016

#### 4.6.2.2. RESULTADOS HUMIDIMÈTRE (P2H)

Pela observação da Fig. 91 e Fig. 92 , obtemos os resultados obtidos pelo equipamento Humidimetre. As condições de apresentação de resultados são em tudo semelhantes ao referido para o caso de estudo 1 (P1).

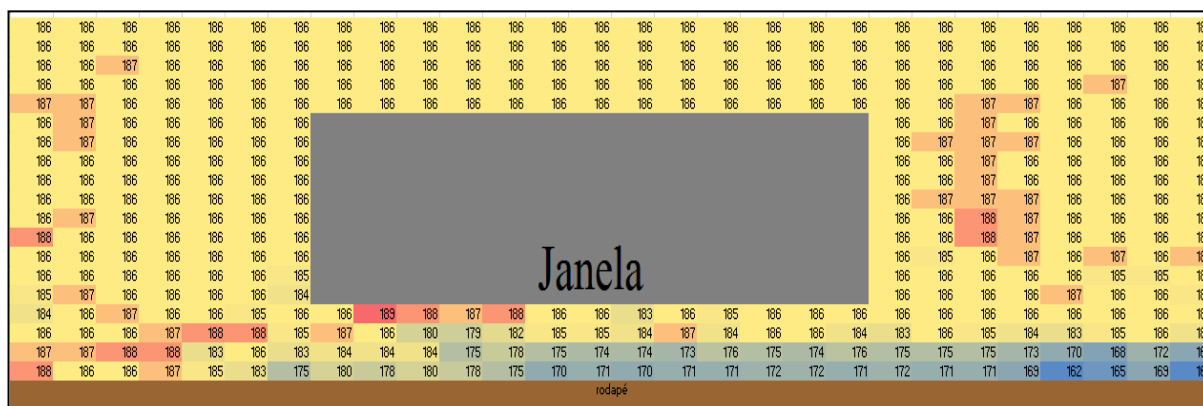


Fig. 91 – Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Humidimètre calibrado com o valor 200 (P2H1)

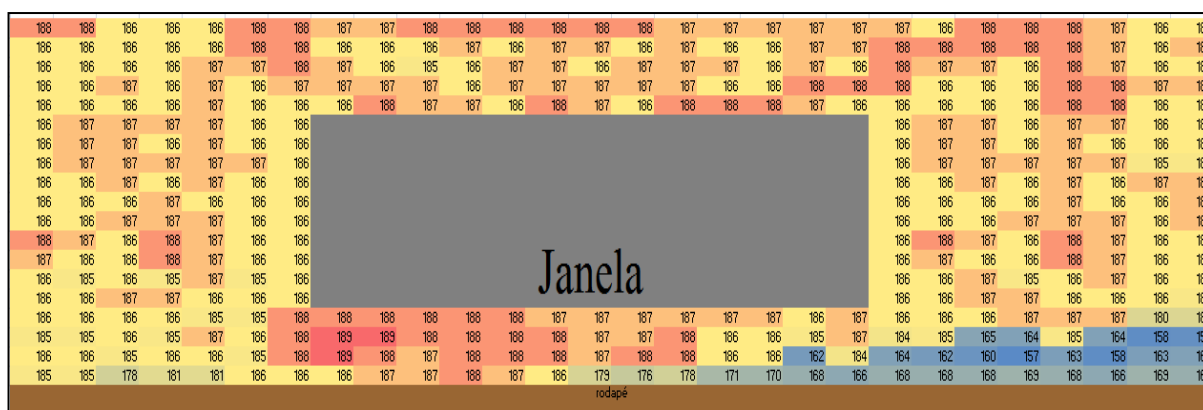


Fig. 92 - Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Humidimètre calibrado com o valor 200 (P2H2)

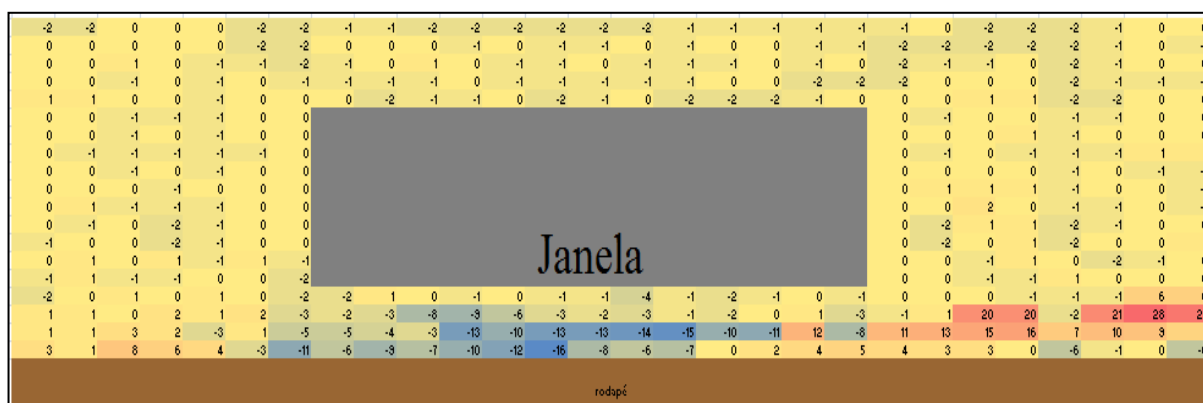


Fig. 93 -Diferença das leituras registadas com o Humidimètre entre o primeiro e segundo ensaio

## 4.6.2.3. RESULTADOS PROTIMETER (P2P)

Os resultados obtidos pelo equipamento Protimeter para que seja possível perceber se existe reprodutibilidade de resultados estão apresentadas nas figuras Fig. 94, Fig. 95 e Fig. 96.

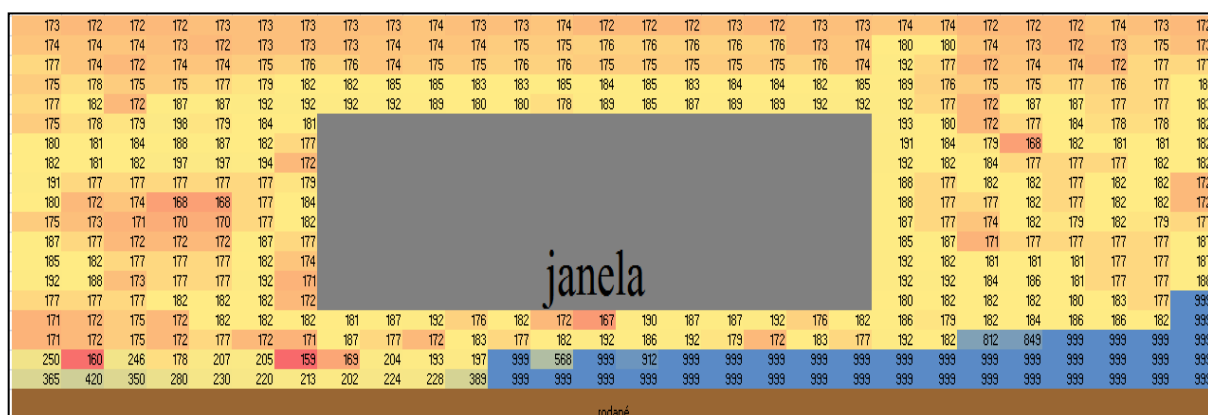


Fig. 94 – Primeiro ensaio com recurso ao equipamento Protimeter MMS2 (P2P1)

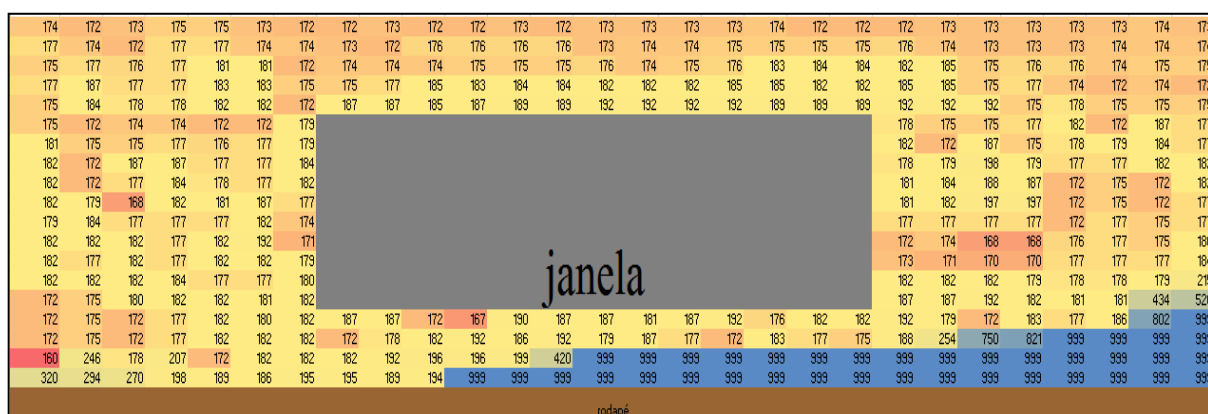


Fig. 95 – Segundo ensaio com recurso ao equipamento Protimeter MMS2 (P2P2)

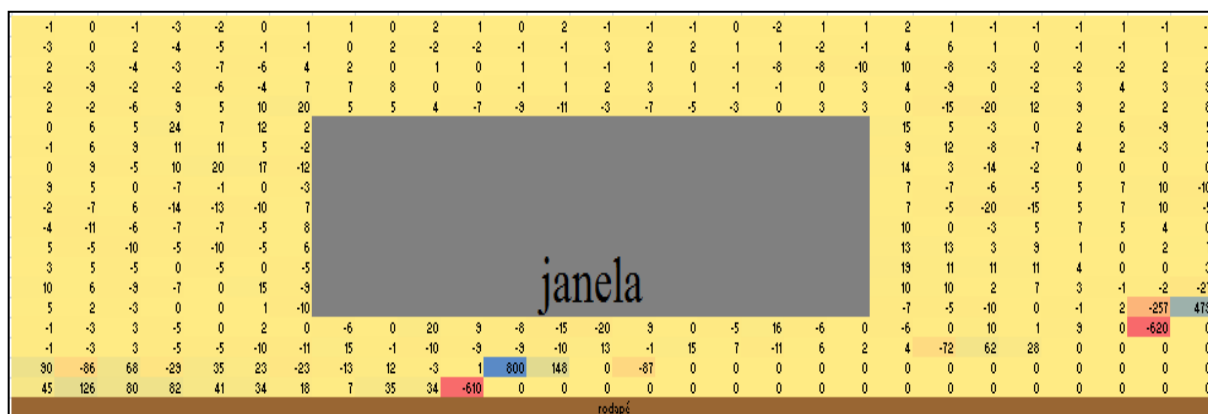


Fig. 96 - Diferença das leituras registadas com o Protimeter MMS2 entre o primeiro e segundo ensaio

#### 4.6.2.4. REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS – MAPEAMENTO HUMIDIMÈTRE (P2)

Os resultados obtido pela utilização do Programa MATLAB com o intuito de mapeamento do teor de humidade são os seguintes para a situação de estudo com o equipamento Humidimètre :

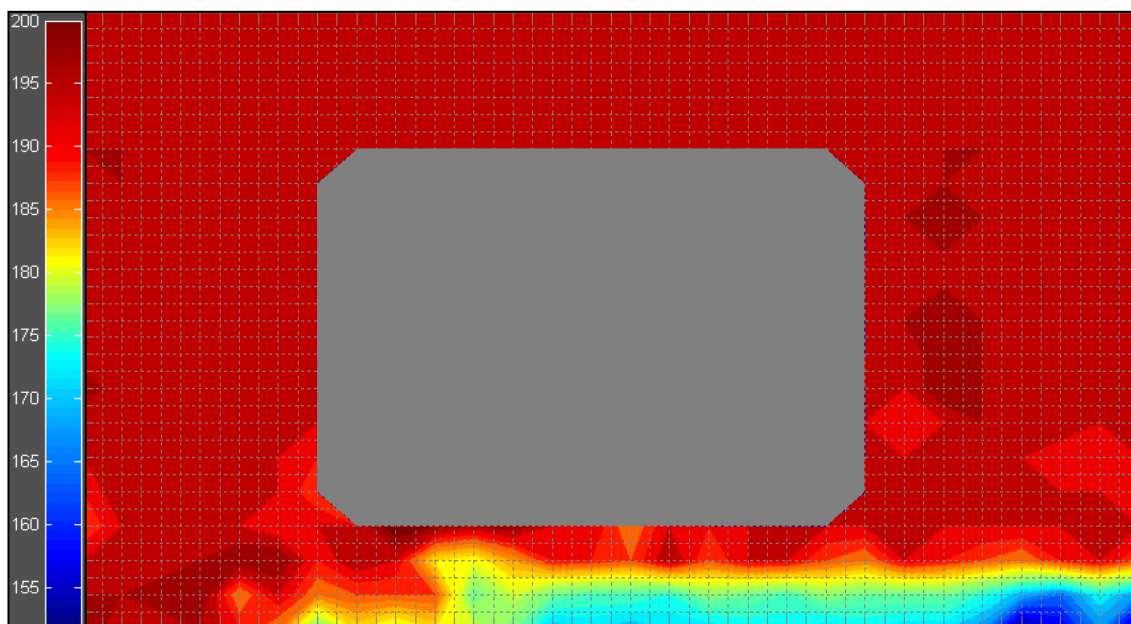


Fig. 97 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo primeiro ensaio medido com o equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 200 (caso de estudo 2) (P2H1)

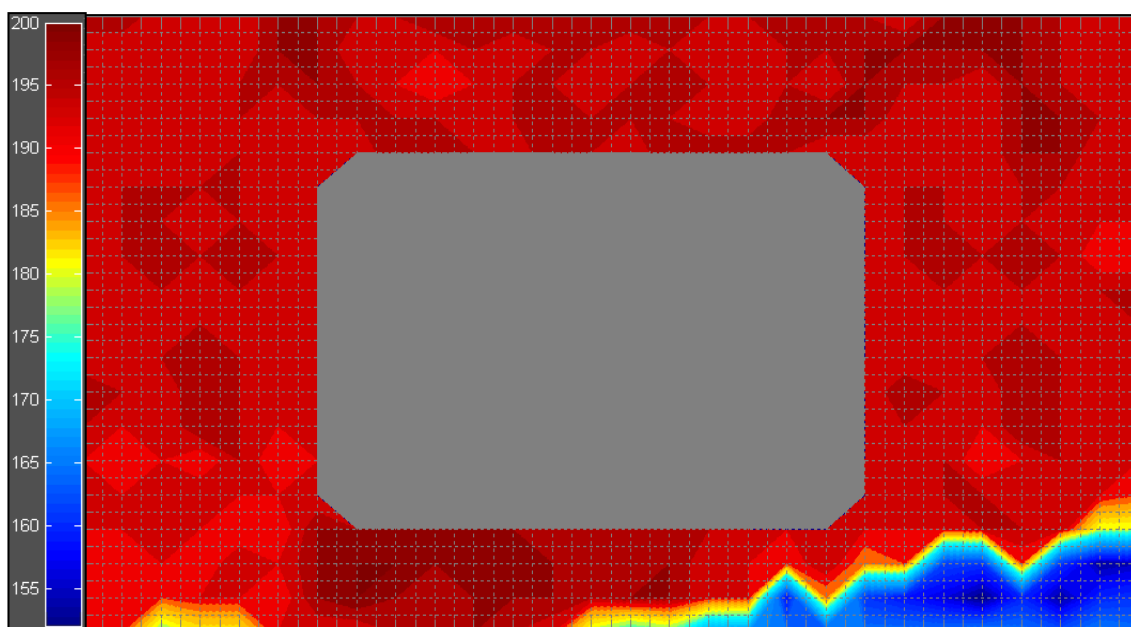


Fig. 98 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo segundo ensaio medido com o equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 200 (caso de estudo 2) (P2H2)

## 4.6.2.5. REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS – MAPEAMENTO PROTIMETER (P2)

Os resultados obtido pela utilização do Programa MATLAB com o intuito de mapeamento do teor de humidade e existência de reprodutibilidade de resultados, são os seguintes para a situação de estudo com o equipamento Protimeter :

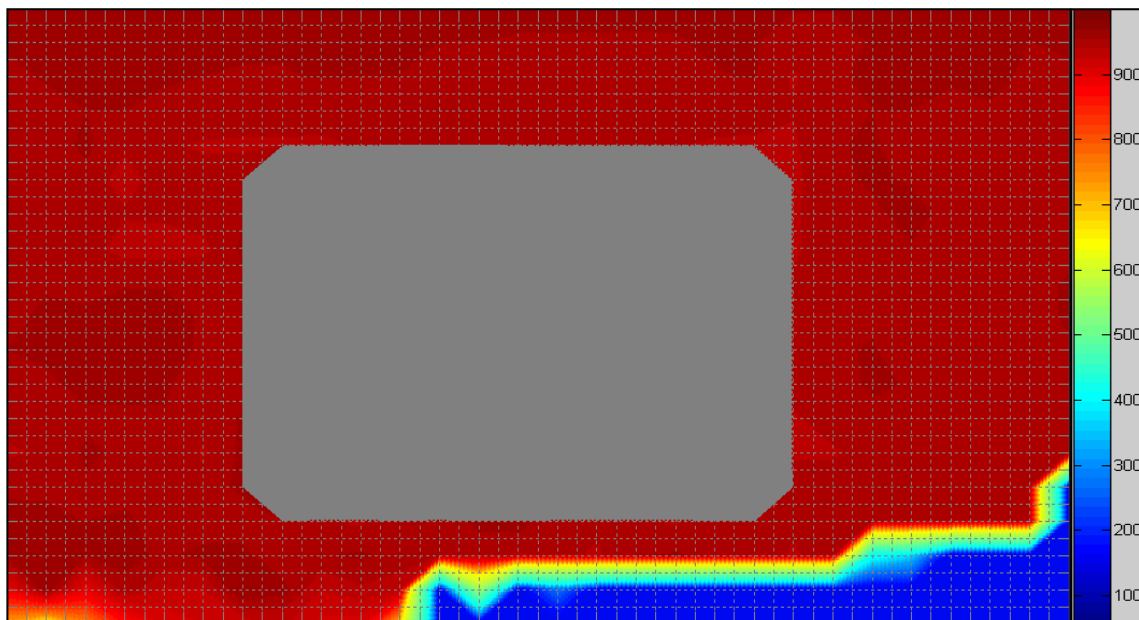


Fig. 99 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo primeiro ensaio medido com o equipamento Protimeter (caso de estudo 2) (P2P1)

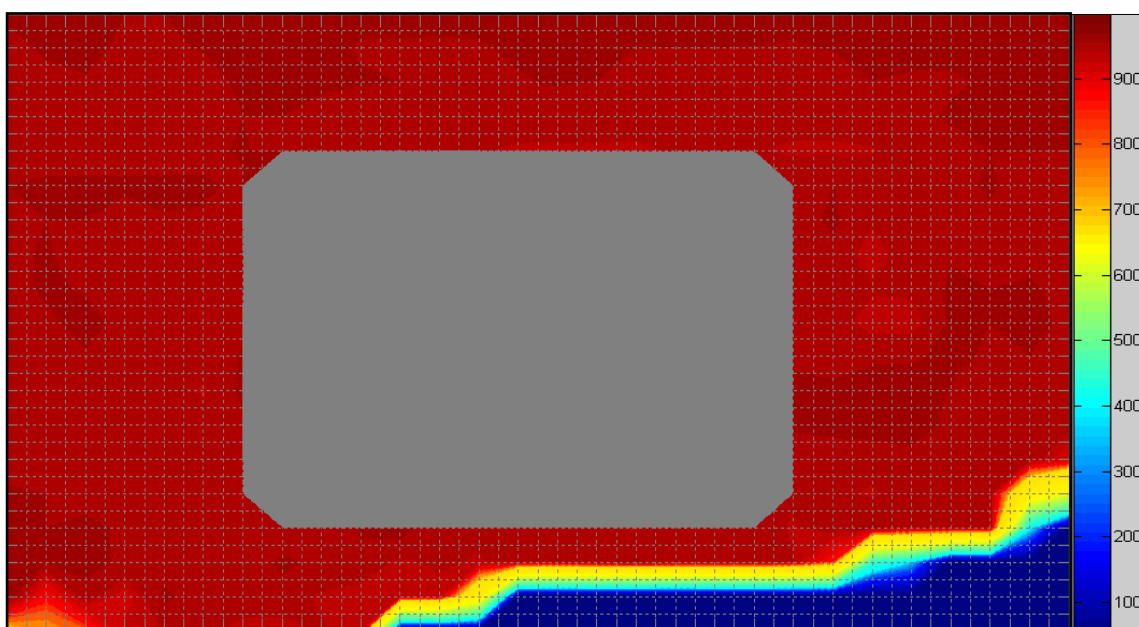


Fig. 100 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo segundo ensaio medido com o equipamento Protimeter (caso de estudo 2) (P2P2)

#### 4.7. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS

Procedeu-se à realização de um estudo de sensibilidade do equipamento Humidimètre com o objetivo de perceber a sua fiabilidade no que diz respeito à calibração. Deste modo, calibrou-se o equipamento para 3 valores distintos nomeadamente, 190, 200 e 210, para que fosse possível perceber qualitativamente as variações de teores de humidade e assim averiguar a sua sensibilidade. Ao invés das situações anteriores em que as medições foram realizadas em dias distintos, neste estudo de sensibilidade interessa manter o máximo de variáveis possíveis constantes. Assim sendo, as medições foram realizadas todas no mesmo período temporal, para o mesmo caso de estudo, nomeadamente o caso de estudo 2, pois foi o que se revelou mais interessante na medida em que as áreas de distribuição estão melhor evidenciadas.

##### 4.7.1.1. REGISTOS METEOROLÓGICOS (P1S)

À semelhança dos ensaios anteriormente referidos, seguidamente está representado, por via gráfica, uma pesquisa das condições meteorológicas registadas pela estação meteorológica do LFC no dia 27 medições.

##### 4.7.1.2. RESULTADOS HUMIDIMÈTRE (P1S)

Seguidamente apresentam-se os resultados das leituras obtidas para os diferentes valores de calibração, 190, 200, 210, respetivamente:

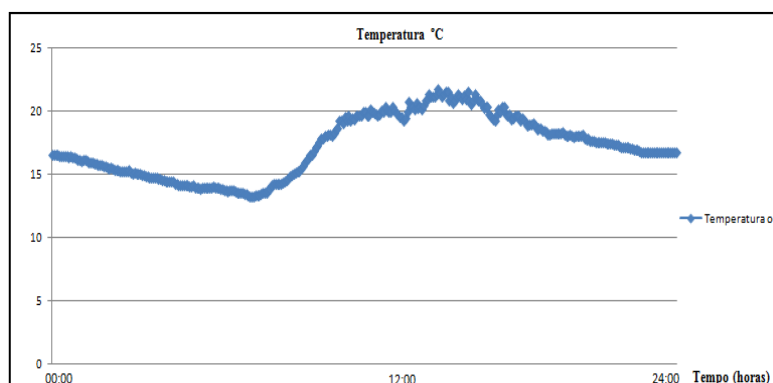


Fig. 101 – Temperatura registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 27/05/2016

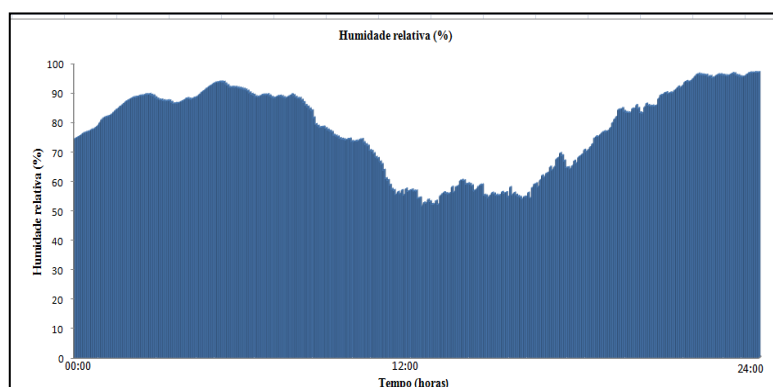


Fig. 102 – Hr (%) registada pela estação meteorológica do LFC, no dia 27/05/2016

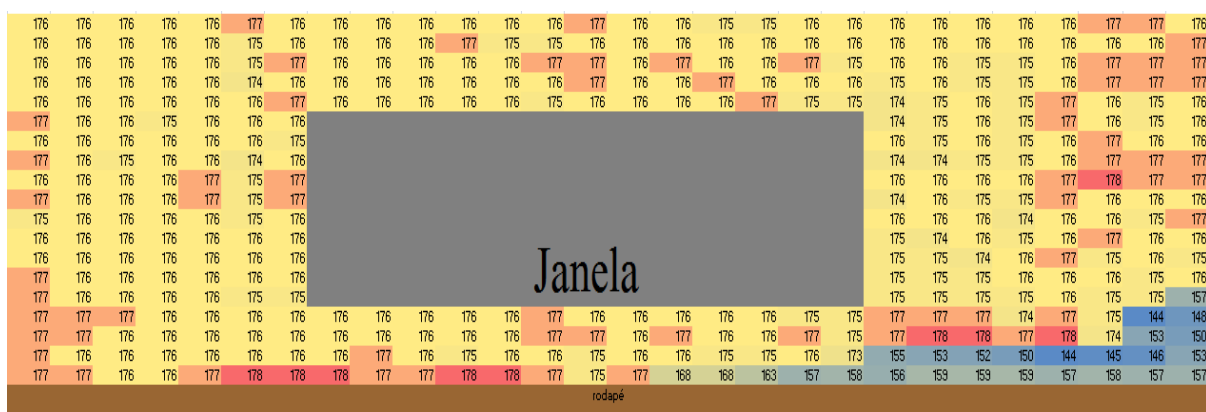


Fig. 103 - Equipamento calibrado para 190

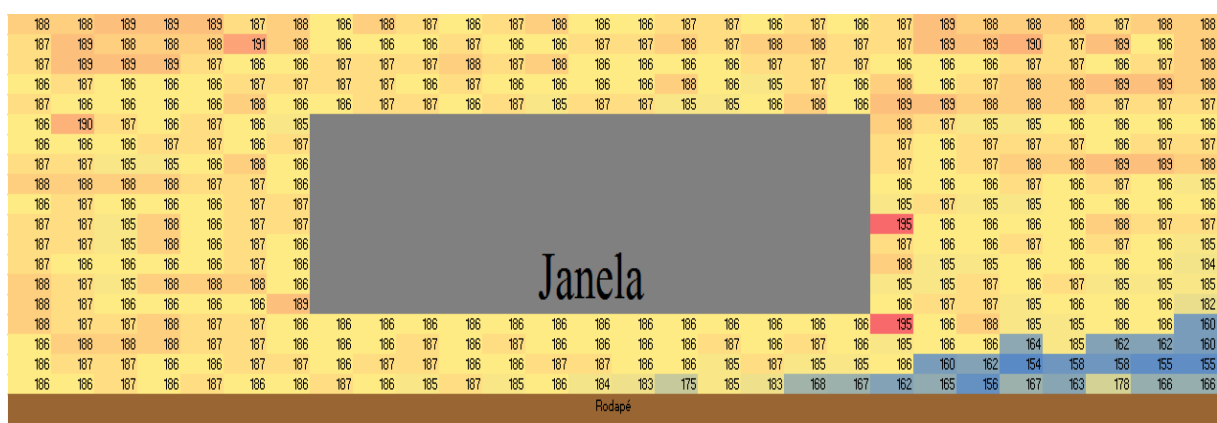


Fig. 104 - Equipamento calibrado para 200

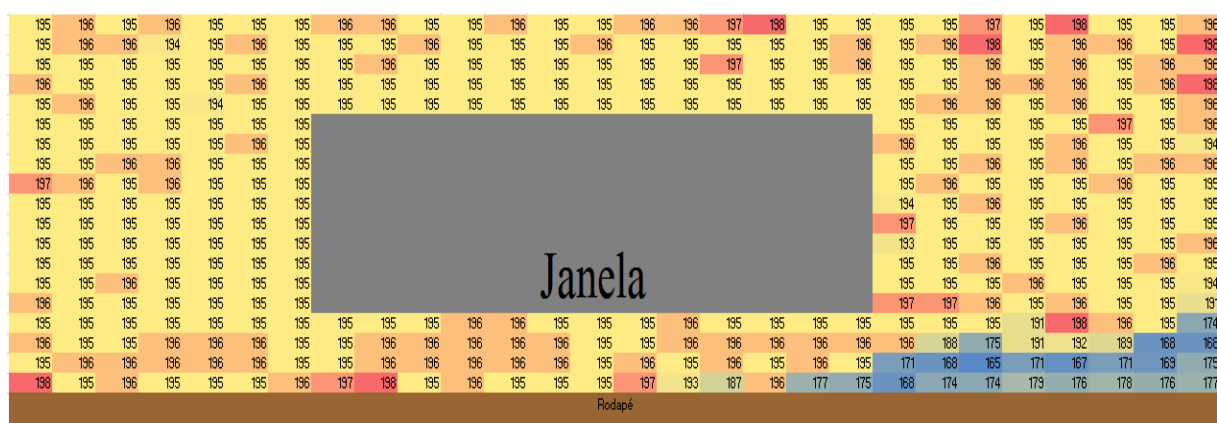


Fig. 105 - Equipamento calibrado para 210

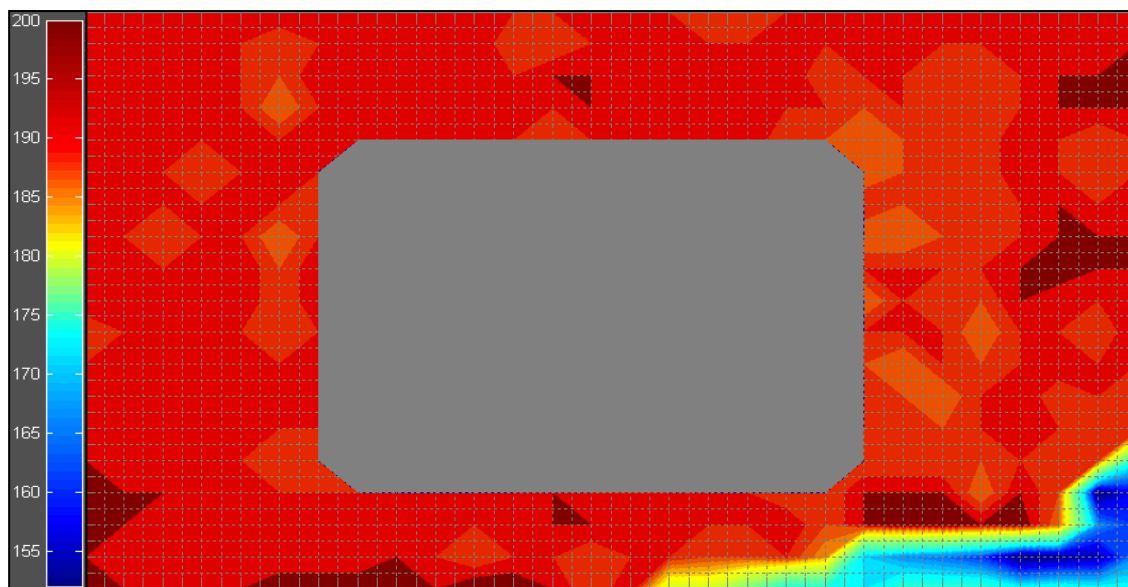


Fig. 106 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 190  
(caso de estudo 2)

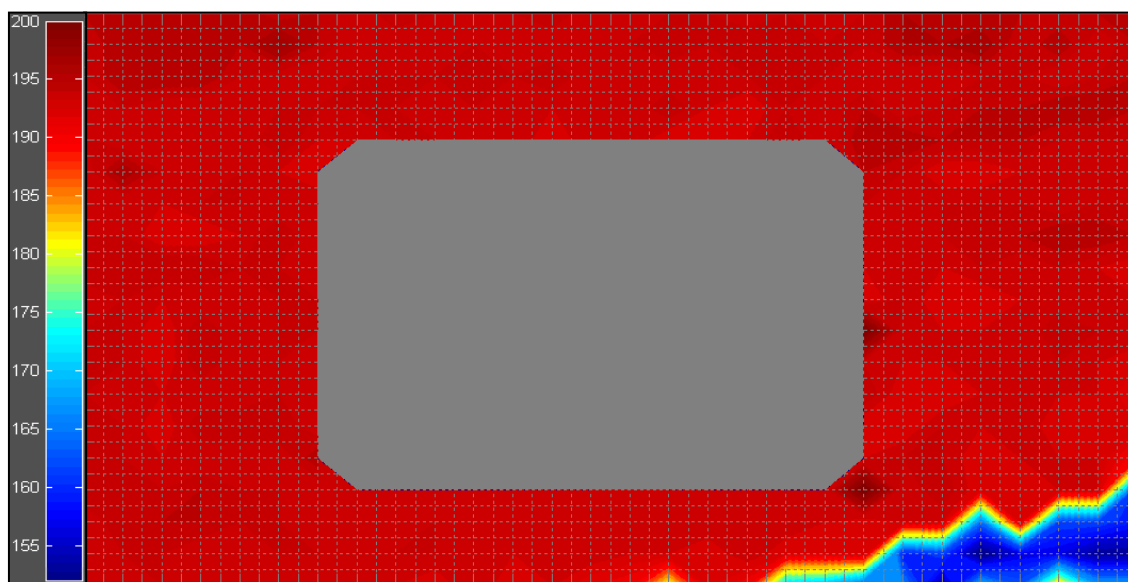


Fig. 107 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 200  
(caso de estudo 2)



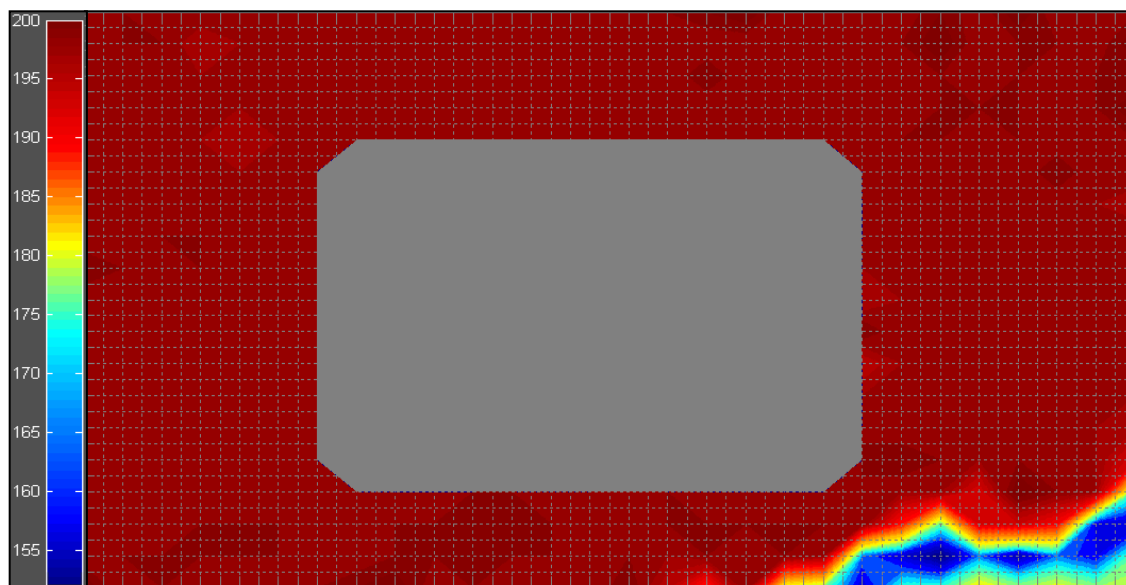


Fig. 108 - Mapeamento de áreas húmidas (MATLAB) obtidas pelo equipamento Humidimètre calibrado para o valor de 210 (caso de estudo 2)

#### 4.8. ANÁLISE CRÍTICA

Verifica-se que nos ensaios com o Humidimètre para o caso de estudo 1 (P1H), tanto as áreas húmidas, como as mais secas, localizam-se nas mesmas zonas da parede, contudo os teores de humidade são ligeiramente superiores na primeira medição (P1.H1). O mesmo sucede nos ensaios realizados com o equipamento Protimeter para o referido caso de estudo (P1P). Estas pequenas variações podem ser resultado de medições realizadas em dias diferentes e com espaços temporais alargados. Constatase na análise temporal que as temperaturas e humidades relativas são semelhantes, contudo não foram analisados estes parâmetros nos dias de intervalo das medições, uma vez que a parede pode ter sido sujeita a condições diferentes e a parede encontrar-se mais ou menos húmida. Acrescenta-se ainda, que existem outros parâmetros influenciadores que não foram tidos em consideração na análise meteorológica realizada, nomeadamente, níveis de precipitação, temperatura interior e humidade relativa interior. Por outro lado, pela observação das tabelas das figuras,

Fig. 75, Fig. 78 e Fig. 93 que registam as diferenças de valores registadas entre os dois ensaios para cada caso de estudo, contata-se que tanto o equipamento Humidimètre, como o Protimeter, apresentam uma maior discrepância nas fronteiras entre áreas húmidas e “secas” (menos húmidas)

Pode ainda estabelecer-se uma certa relação de semelhança entre ambos equipamentos para o relatado caso de estudo (P1), uma vez que embora com valores medidos e as escalas utilizadas serem distintas, é possível apurar qualitativamente áreas húmidas semelhantes.

Em relação às medições efetuadas com o Humidimètre (P2H) na segunda situação estudada (P2), as conclusões obtidas são semelhantes às anteriormente referidas no primeiro caso de estudo 1. (P1H). No entanto, as medições registadas com o Protimeter (P2P) refletem uma maior estabilidade tanto em

termos de áreas de distribuição de humidade, como também nos teores de humidade obtidos. Neste caso, existe uma forte reprodutibilidade de resultados.

Analogamente ao sucedido no primeiro caso de estudo (P1), os gráficos de mapeamento das medições referentes aos dois equipamentos são bastante semelhantes, e qualitativamente constituem uma forte parecer sobre as zonas com teores de humidade mais elevados. Neste segundo caso de estudo, as semelhanças entre as medições de ambos os aparelhos são ainda mais fortes e estáveis, e deste modo, no sentido do diagnóstico das manifestações de humidade, reconhece-se uma maior facilidade de conclusões.

Apesar de algumas variações, pode concluir-se que em ambos os casos de estudo, comprova-se uma notável reprodutibilidade de resultados, pelo que analisando os gráficos de distribuição de humidade existe um elevado grau de semelhanças registadas entre as medições realizadas nas mesmas condições de ensaio, á exceção das condições expostas previamente.

No que concerne á sensibilidade do aparelho Humidimètre referente á análise do segundo caso de estudo (P2S), as semelhanças da distribuição de humidades são razoáveis, contudo verificam-se algumas alterações dos valores de teor de humidade.

Na calibração com o valor de 190 repara-se que as áreas húmidas são ligeiramente superiores do que o equipamento calibrado para o valor de 200. Essa diferença superioriza-se ainda mais quando comparada com o valor de calibração de 210. O mesmo sucede para as áreas mais secas, porém com menores níveis de correlação entre os três ensaios calibrados para valores distintos (190, 200, 210).

É admissível constatar que o valor de 200, referido pelo manual de utilização do referido equipamento e pela maioria da literatura, é o que apresenta resultados mais uniformes e com áreas de humidade mais delimitadas e específicas. Todavia, não é possível afirmar que é o valor de calibração mais indicado quando este ensaio incide sobre outros tipos de materiais. Os valores dos teores de humidade registados, com o equipamento calibrado para o valor de 200, em argamassas em estado “seco”, aproximam-se de uma gama de valores entre os 180 e os 190. Face a esta situação explica-se a aceitável correlação entre os valores com equipamentos calibrados entre 190 e 200. No caso de outros materiais, como por exemplo materiais hidratados ou com coeficientes de absorção distintos assume-se que este valor de calibração poderá ser outro.

Com base nos resultados obtidos nesta dissertação pode afirmar-se que:

- Equipamentos elétricos diferentes baseados no mesmo princípio, fornecem resultados qualitativos similares;
- O equipamento Humidimètre é sensível à alteração do valor de calibração;
- Existe reprodutibilidade de resultados;
- Os equipamentos apresentam menor fiabilidade nos pontos de medição das fronteiras entre áreas de teor de humidade elevado e reduzido;
- As condições climáticas exteriores provavelmente alteram as leituras obtidas;
- A utilização do método gravimétrico é o único método onde se obtêm valores do teor de humidade quantitativos;
- É possível mapear a distribuição do teor de humidade com recurso a ferramentas de cálculo.

# 5

## CONCLUSÕES

### 5.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

Nesta dissertação conclui-se a importância que existe na medição do teor de humidade para a não deterioração precoce dos materiais. Embora se tenha abordado simplesmente alguns dos métodos de medição do teor de humidade existentes, conclui-se que só se consegue medir humidade com um elevado grau de confiança através do método gravimétrico, isto é por secagem em estufa ventilada. É ainda perceptível que só interessa medir o teor de humidade caso se saiba quais os valores de referência do material em questão, pois só desta forma se consegue localizar o estado em que o material se encontra, isto é, seco, húmido. Desta forma, materiais diferentes apresentam limites críticos e saturados distintos. Fez-se uma breve abordagem os tipos de manifestações possíveis, de modo a enquadrar e sinalizar o que pode suceder caso os limites críticos sejam ultrapassados.

Conseguiu-se ainda perceber que os métodos elétricos testados de determinação do teor de humidade apresentam uma razoável reprodutibilidade de resultados, contudo não apresentam grande expressão quantitativamente. Todavia, com recurso á ferramenta de cálculo utilizada para o mapeamento da distribuição do teor de humidade, este método revelou uma interessante abordagem qualitativa. Conclui-se ainda que para os materiais presentes em ambos os casos de estudo o valor de calibração de 200 para o equipamento Humidimètre, é o mais indicado, no entanto fica em aberto a eventual alteração deste valor para outros materiais (como por exemplo gesso).

Em síntese, os objetivos que foram propostos foram abordados, nomeadamente:

- Foi realizada uma sensibilização da importância da medição do parâmetro teor de humidade no que concerne ao controle de qualidade, no diagnóstico e no monitoramento dos materiais de construção;
- Estabeleceu-se uma lista de valores de referência dos materiais mais comuns de construção para que seja possível a comparação com o valor real e aferir o estado em que se encontra (seco ou húmido);
- Foram aprofundados métodos de deteção do teor de humidade;
- Realizaram-se ensaios experimentais de medição do teor de humidade com recurso a dois equipamentos elétricos distintos, pelo que mediram-se os teores de duas paredes diferentes;
- Realizou-se um mapeamento qualitativo da distribuição de áreas húmidas;
- Testou-se a sensibilidade de calibração do aparelho Humidimètre.

Expecta-se que a presente dissertação confira uma mais-valia para a determinação do teor de humidade.

## **5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Após a composição desta dissertação é evidente a necessidade de desenvolvimentos e estudos futuros. Com o intuito de uma investigação futura sugere-se o desenvolvimento dos seguintes temas:

- Criação de uma base de dados com valores de referência para uma maior variedade de materiais de construção;
- Desenvolver documentos normativos ou guias de procedimento para os respetivos métodos de medição do teor de humidade para padronização de resultados;
- Desenvolver fichas catálogo de equipamentos, especificando o método de procedimento e interpretação (nomeadamente para equipamentos mais recentes);
- Estudo de sensibilidade do equipamento Humidimètre para vários materiais distintos;
- Criar uma lista de tempos de secagem aconselhados, consoante o tipo de material e revestimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ramos, Nuno. *Modelo da variação da humidade relativa no interior dos edifícios*. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
- [2] Freitas, Vasco Peixoto, Torres, Maria Isabel, Guimarães, Ana Sofia. *Humidade Ascensional*-Faculdade de Engenharia do Porto, 1º edição, 2008
- [3] Hedenblad, Goran. *Protection buildings against moisture. Drying of construction water in concrete*. Dagmar Design AB, Stockholm, 1996.
- [4] Delcelier, Pierre. *Transferts de vapeur. Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment*, Paris, 1989.
- [5] Gonçalves, Lanzinha, Peixoto, José Carlos, Freitas, Vasco Peixoto. *Propriedades higrotérmicas de matérias de construção: um catálogo*. FEUP- Departamento de Engenharia Civil, Porto, 1998.
- [6] International Energy Agency. *Condensation and Energy. Catalogue of Material Properties*. Report Annex XVI, Volume 3, 1991.
- [7] ISO/FDIS 10456:2007 (E). *Building materials and products- Hygrothermal properties- Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*.2007.
- [8] Anh Dung Tran Le. *Etude des Transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (sous titre: simulation numérique et approche expérimentale)*. 2012.
- [9] Hartwig, M. Kunzel. *Simultaneous heat and moisture transport in buildings components*. Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [10] Silva, J. A. R. Mendes da, Torres, Silva. *Humidade na construção síntese das causas e estratégias de reabilitação*. Coordenação Editorial de José António Raimundo Mendes da Silva Departamento de Engenharia Civil Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2009.
- [11] Camuffo, Dario; Bertolin, Chiara. *Towards Standardisation of Moisture Content Measurement in Cultural Heritage Materials*. Italy, 2012.
- [12] Moller, Eva B.; Hansen, Ernst Jan de Place; Brandt, Erik; Kielsgaard Hansen, Kurt. *Moisture measurement in building materials:an overview of current methods and newapproches*, 2014
- [13] ASTM-Designation: D 4442 – 92 (Reapproved 2003).*Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Material*,1992.
- [14] Sandrolini, F., Franzoni, E.*An Operative protocol for reliable measurments of moisture in porous materials of ancient buildings*, 2006. 41:Pág. 1372-1380.
- [15] ASTM D4442-15. *Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials*.2015
- [16] Norma CEN/TC 89 N 338E (1994). *Building material determination of moisture content. Principles of Testing*.
- [17] DIN 18560-4:2011-03. *Estriche im Bauwesen - Teil 4: Estriche auf Trennschicht*.2011.
- [18] INTERNATIONAL STANDARD ISO 4470-1981 (E). *Sawn timber - Determination of the average moisture content of a lot*.1981.
- [19] *Protimeter MMS2 Instruction Manual*, April, 2012

- [20] Said, M.N, P.Eng., D. *Moisture measurement guide for building envelope applications*. Canada, 2004.
- [21] M.C. Phillipson, P.H. Baker, M. Davies, Z. Ye, A. McNaughtan, G.H. Galbraith and R.C. McLean. *An Overview of Principles and Techniques of Moisture Properties Measurement for Building Materials and Components*, 1998.
- [22] Jon Arno,Troy, Minnesota, B. Alan Bendtsen,Madison, Wisconsin .*Wood as an engineering material*. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report.
- [23] EN 13183-1:2002 . *Moisture contenr of a piece of sawn timber – Part 1 : Determination of oven dry method*.2002
- [24] Forsen, Holger, Tarvainen, Veikko. *Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters*, 2000.
- [25] <http://www.doser.de/messtechnik/en/home/infos/capacitive-measuring-principle---.php>. Data de acesso: 20/04/2016.
- [26] Marinho, Mariana Isabel Matos. *Diagnóstico de patologias associadas à humidade utilizando técnicas não destrutivas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em construções, Universidade de Engenharia da Faculdade do Porto, Junho 2014.
- [27] Hartley, Jamie; Marchant, John . *Methods of determining the moisture content fo wood*. Sydney, 1995.
- [28] EN 13183-3: 2005. *Moisture content of a piece of sawn timber. Estimation by capacitance method*,
- [29] Peterson, Charles - *Hand held moisture meteres*, 2008.
- [30] William F. Lyons, Jr., Roland Lessard. *Dielectric wood moisture meter*. Patente US 6708555 B1, 2002.
- [31] Healy, W.M., *Moisture sensor technology- a summary of techniques for measuring moisture levels in building envelopes*. 2003.
- [32] Trabelsi, S., Kraszewski, A. W., Nelson, S., O. *Universal calibration method for microwave moisture sensing in granular materials*. 2001.
- [33] Henriques, F.M.A.. *Humidade em Paredes*. LNEC, Lisboa, 1994.
- [34] <https://www.berthold.com/en/pc/moisture-microwave-technology>. Data de acesso:18/04/2016.
- [35] [http://www.rgi-ms.com/html/moisture\\_principles.html](http://www.rgi-ms.com/html/moisture_principles.html)]. Data de acesso:19/04/2016.
- [36] Lundgren, Niks. *Microwave Sensors for Scanning of Sawn Timber*, 2007.
- [37] Laio, F., Porporato, A., Ridol, L., Rodriguez-Iturbe, I.. *Plants in water-controlled ecosystems: Active role in hydrologic processes and response to water stress II. Probabilistic soil moisture dynamics*. Adv. Water Resour,2001.
- [38] Rodriguez-Iturbe, I. Ecohydrolog. *A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics*. Water Resour, 2000.

- [39] Feddes, R.A., Hoff, H., Bruen, M., Dawson, T., Rosnay, P., Dirmeyer, P., Jackson, R.B., Kabat, P., Kleidon, A., Lilly, A., Pitman, A.J. *Modeling root water uptake in hydrological and climate models*. Soc. 2001.
- [40] Stangl, R.; Buchan, G.D.; Loiskandl, W. *Field use and calibration of a TDR-based probe for monitoring water content in a high-clay landslide soil in Austria*. 2009.
- [41] Davis JL, Annan AP. *Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy*. Geophys Prospect, 1989.
- [42] [http://imko.de/download/AboutArticles/CTI\\_HoheAnforderungen/General%20Requirements%20to%20Moisture%20Measurement\\_web.pdf](http://imko.de/download/AboutArticles/CTI_HoheAnforderungen/General%20Requirements%20to%20Moisture%20Measurement_web.pdf). Data de acesso:24/04/2016.
- [43] *EasyTest, Lublin, Poland*
- [44] Paul, W. *Prospects for controlled application of water and fertiliser, based on sensing permittivity of soil*. Comput. Electron. Agric, 2002.
- [45] Malicki, M.A., Skierucha, W. *A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse*, 1989.
- [46] Carvalho, Patricia Nogueira. *Medição do teor de humidade em materiais de construção*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em construções, Universidade de Engenharia da Faculdade do Porto, Junho 2010.
- [47] Noborio K.. *Mesurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review*.
- [48] Ponizovsky, A.A., Chudinova, S.M., Pachepsky, Y.A. *Performance of TDR calibration models as affected by soil texture*. J. Hydrol. 1999.
- [49] Reeves, T. L., Smith, M. A. *Time domain reflectometry for water content in range surveys*.
- [50] Beiser: *Concepts of Modern Physics(gamma decay)*, Pág. 471-473, Serway.
- [51] Priyada.P -*Gamma ray scattering non destructive evaluation studies*. A thesis submitted to the board of studies in physical science in partial fulfillment of requirements for degree of docto of philosophy of homi bhabha national institute. India, 2013
- [52] *France-Japan Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Materials and Components*, Japan,1998.
- [53] Freitas, Vasco Peixoto de -*Transferência de humidade em paredes – Análise do fenómeno de interface*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1992.
- [54] P.Rucker,A.Holm,M.Krus. *Determination of moisture and salt content distributions by combining NMR and gamma ray measurements*, Fraunhofer Institute for Buildings Physics, September 2000,
- [55] Bernd Wolter, Frédéric Kohl, Nina Surkowa, Gerd Dobmann. *Practical Applications of NMR in Civil Engineerin*. Fraunhofer-Institut fuer zerstoerungsfreie Pruefverfahren (IZFP), Universitaet Gebaeude 37, 66123 Saarbrueck,2002.
- [56] M. Sc. Agnes Haber. *Relaxation-relaxation exchange experiments in porous mediawith portable Halbach-magnets*. Ph. D. Student, 2008.

[57] G.Dobmann,M.Kroening, N.Surkowa, L.vonBernus,B. Wolter. *The Potencial of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) to Non-Destructively Characterize Early – Age Concrete by an One-Sided Acess (OSA) Technique*. Fraunhofer-Institut fuer zertoerungsfre ie Pruefverfahren (IZFP),Universita Geb.3766123 Saarbruecken, Germany),2002.